



FINAL PROJECT - TM 141585

**NUMERICAL INVESTIGATION OF THREE DIMENSIONAL
FLOW THROUGH RECTANGULAR DUCT WITH ANGLE
OF DAMPER OPENING VARIANT**

**EDO EDGAR SANTOSA PUTRA
NRP 2113 105 033**

**Counselor
Dr.Wawan Aries Widodo, ST, MT**

**PROGRAM SARJANA - LINTAS JALUR
LABORATORIUM MEKANIKA DAN MESIN-MESIN FLUIDA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016**



TUGAS AKHIR - TM 141585

**SIMULASI NUMERIK ALIRAN TIGA DIMENSI
MELALUI *RECTANGULAR DUCT* DENGAN VARIASI
BUKAAN *DAMPER***

EDO EDGAR SANTOSA PUTRA
NRP 2113 105 033

Dosen Pembimbing
Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT

PROGRAM SARJANA - LINTAS JALUR
LABORATORIUM MEKANIKA DAN MESIN-MESIN FLUIDA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

**SIMULASI NUMERIK ALIRAN TIGA DIMENSI
MELALUI *RECTANGULAR DUCT* DENGAN
VARIASI BUKAAN *DAMPER***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin
pada
Bidang Studi Konversi Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

EDO EDGAR SANTOSA PUTRA

NRP. 2113 105 033

Mengetahui / Menyetujui :

<u>Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT</u> (NIP. 197104051997021001)(Pembimbing)
<u>Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, Ph.D</u> (NIP. 196412281990031002)(Penguji I)
<u>Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT</u> (NIP. 196202161995121001)(Penguji II)
<u>Aida Annisa Amin Daman, ST, MT</u> (NIP. 198907052015042005)(Penguji III)

**SURABAYA
Januari 2016**

SIMULASI NUMERIK ALIRAN TIGA DIMENSI MELALUI RECTANGULAR DUCT DENGAN VARIASI BUKAAN DAMPER

Nama Mahasiswa : Edo Edgar Santosa Putra.
NRP : 2113 105 033
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T, M.T

Abstrak

Dalam sistem ducting terdapat banyak penggunaan elbow dan assesoris lain yang akan menyebabkan terjadinya kerugian tekanan pada aliran. Hal tersebut disebabkan karena adanya perubahan arah aliran fluida yang melalui saluran tersebut. Nilai penurunan tekanan (pressure drop) pada aliran yang melalui suatu saluran dipengaruhi oleh besarnya laju aliran pada inlet, serta radius kelengkungan dari elbow yang akan menyebabkan aliran sekunder kemudian timbul aliran vortex. Hal ini berakibat kerugian energy (headloss) yang lebih besar. Peletakan bodi pengganggu dan pemasangan elbow dimaksudkan untuk melihat fenomena aliran di sekitar bodi pengganggu

Model uji yang akan digunakan di dalam studi ini berupa rectangular ducting yang pada bagian inlet terpasang elbow 90° dengan damper yang diletakkan pada jarak $x/D_h=2$. Fluida kerjanya adalah udara yang mengalir secara incompressible, viscous, steady dan mempunyai profil kecepatan uniform pada sisi inlet dengan dua variasi bilangan Reynolds yaitu 2.05×10^5 dan 8.2×10^5 serta empat pengaturan sudut bodi pengganggu 0°, 10°, 20°, dan 30°. Penelitian dilakukan secara numerik 3D menggunakan piranti lunak Computation Fluid Dynamics (CFD) komersial dengan model turbulensi k-ε Realizable.

Hasil studi ini diperoleh bahwa proses recovery aliran dipengaruhi oleh sudut bukaan damper. Sudut bukaan damper 30° terjadi percepatan aliran pada daerah dekat dinding yang

berakibat bertambahnya momentum aliran sehingga mempercepat proses recovery aliran dan aliran sekunder pada daerah dekat dinding dapat teratasi.

Kata kunci: Ducting, elbow, pressure drop, aliran sekunder, head loss, vortex, damper

NUMERICAL INVESTIGATION OF THREE DIMENSIONAL FLOW THROUGH RECTANGULAR DUCT WITH ANGLE OF DAMPER OPENING VARIANT

Name : Edo Edgar Santosa Putra.
NRP : 2113 105 033
Department : Teknik Mesin
Advisor : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T, M.T

Abstract

In a ducting system there are so many fitting is used such as elbow and others fitting causes pressure drop. Pressure drop is caused by changes of flow direction which through of it. Pressure drop in a ducting system is influenced by mass flow rate of inlet and curvature radius of elbow which can appear secondary flow, then it develops vortex. Consequences, it causes greater head loss. Installation of disturbance body and elbow is intended to observe flow phenomenon around disturbance body

The testing model that is used in this simulation is a rectangular duct which is installed 90° elbow on a inlet and damper that located at $x/D_h=2$. Fluid material is air which incompressible flow, viscous, steady and it has uniform profile velocity on inlet with two variant of Reynolds number are 2.05×10^5 and 8.2×10^5 , it runs with four adjustment angle of damper 0°, 10°, 20°, and 30°. Research is held in numerical, three dimensional uses Computation Fluid Dynamics (CFD) commercial software with k-ε Realizable turbulent model.

As a result, it is obtained that recovery flow is influence by damper opening. In angle of 30° occurs acceleration on near-wall region which increases flow momentum, as of increase recovery process and secondary flow which occurs on near-wall region can be solved.

Key Words : *Duct, elbow, pressure drop, secondary flow, head loss, vortex, damper*

KATA PENGANTAR

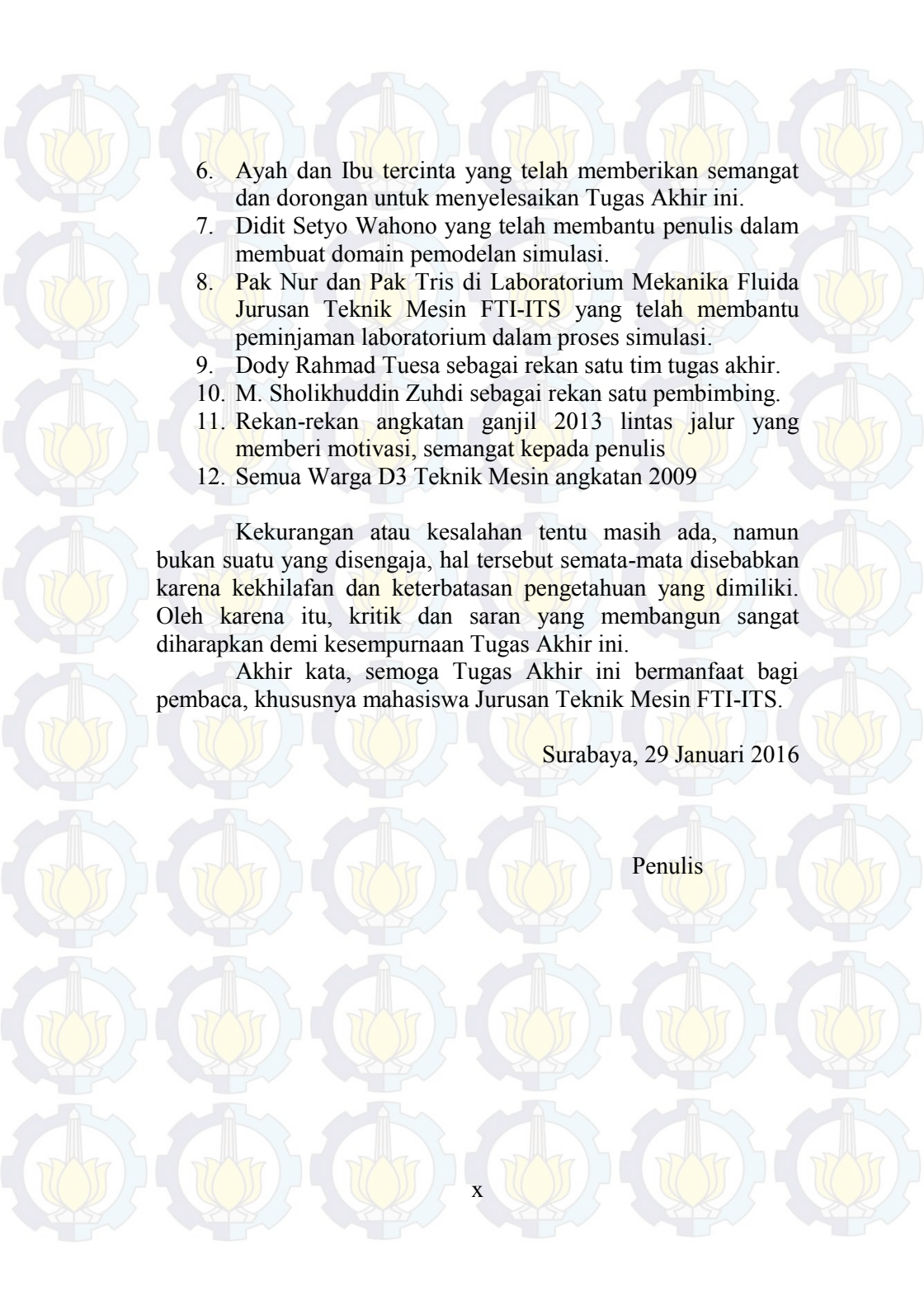
Segala puji syukur kita panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan segala rahmat dan hidayah-Nya hingga penulis dengan segala keterbatasannya dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

SIMULASI NUMERIK ALIRAN TIGA DIMENSI MELALUI *RECTANGULAR DUCT* DENGAN VARIASI BUKAAN *DAMPER*

Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi untuk memenuhi gelar Sarjana Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS dengan tujuan agar mahasiswa dapat menerapkan teori yang telah didapat selama masa perkuliahan terutama mata kuliah Mekanika Fluida.

Dalam kesempatan ini penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini
2. Bapak Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng, selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
3. Prof. Sutardi selaku dosen wali.
4. Tim Dosen penguji yang telah bersedia meluangkan waktu, tenaga, pikiran dalam rangka perbaikan tugas akhir ini.
5. Bapak atau ibu dosen dan karyawan di lingkungan Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS serta semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu atas kerjasamanya selama ini dalam perkuliahan maupun dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

- 
6. Ayah dan Ibu tercinta yang telah memberikan semangat dan dorongan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
 7. Didit Setyo Wahono yang telah membantu penulis dalam membuat domain pemodelan simulasi.
 8. Pak Nur dan Pak Tris di Laboratorium Mekanika Fluida Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS yang telah membantu peminjaman laboratorium dalam proses simulasi.
 9. Dody Rahmad Tuesa sebagai rekan satu tim tugas akhir.
 10. M. Sholikhuddin Zuhdi sebagai rekan satu pembimbing.
 11. Rekan-rekan angkatan ganjil 2013 lintas jalur yang memberi motivasi, semangat kepada penulis
 12. Semua Warga D3 Teknik Mesin angkatan 2009

Kekurangan atau kesalahan tentu masih ada, namun bukan suatu yang disengaja, hal tersebut semata-mata disebabkan karena kekhilafan dan keterbatasan pengetahuan yang dimiliki. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca, khususnya mahasiswa Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

Surabaya, 29 Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. LATAR BELAKANG.....	1
1.2. RUMUSAN MASALAH.....	2
1.3. BATASAN MASALAH.....	4
1.4. TUJUAN PENELITIAN.....	4
1.5. MANFAAT PENELITIAN.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Persamaan Euler Dalam Koordinat <i>Streamline</i>	6
2.2 Bilangan Reynolds.....	8
2.3 <i>Pressure Coefficient</i> (C_p).....	8
2.4 Aliran di Dalam Pipa.....	9
2.5 Penelitian Aliran Yang Melalui <i>U-Bend</i>	13
2.6 Karakteristik Aliran Yang Melewati Saluran Dengan <i>Butterfly Valve</i> Sebagai Body Pengganggu.....	23
2.7 Karakteristik Aliran Melalui <i>Rectangular Duct</i> Dengan Elbow 90°.....	25
2.8 <i>Grid Independency</i>	28
2.9 Model Turbulensi.....	29
2.10. Perbandingan Berbagai Model Turbulensi Pada <i>Bend</i>	32
2.11. Intensitas Turbulensi.....	33
2.12. Kondisi Batas.....	33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1. Geometri <i>ducting</i>	36
3.2. Metode Numerik.....	36
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	45
4.1. Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan Pada Sudut Kemiringan $\alpha=0^\circ$ dan 30° $Re=2.05 \times 10^5$	45
4.1.1. Perbandingan Vektor Kecepatan Setiap <i>Cross-Section</i> Pada $Re = 2.05 \times 10^5$ Dengan Sudut Kemiringan $\alpha=0^\circ$ dan 30°	50
4.2. Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan Pada Sudut	

Kemiringan $\alpha=0^\circ$ dan 30° $Re=8.2 \times 10^5$	52
4.2.1. Perbandingan Vektor Kecepatan Setiap <i>Cross-Section</i> Pada $Re = 8.2 \times 10^5$ Dengan Sudut Kemiringan $\alpha=0^\circ$ dan 30°	56

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	59
----------------------------------	----

DAFTAR PUSTAKA	34
----------------------	----

LAMPIRAN	
----------	--

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Gerakan partikel fluida di sepanjang <i>streamline</i>	7
Gambar 2.2	Separasi lapisan batas.....	10
Gambar 2.3	Aliran ideal melalui belokan	11
Gambar 2.4	Aliran sekunder	12
Gambar 2.5	Elbow 90° section.....	13
Gambar 2.6	Penempatan posisi <i>cross section</i>	14
Gambar 2.7	Elbow 90° section tampak atas	14
Gambar 2.8	Distribusi profil kecepatan (m/s) di setiap <i>cross section</i> dengan dan tanpa <i>guide vane</i>	16
Gambar 2.9	<i>Velocity</i> (m/s) <i>magnitude contour</i> bend (a) tanpa <i>guide vane</i> dan (b) dengan <i>guide vane</i>	17
Gambar 2.10	Distribusi <i>Cp inner</i> dan <i>outer wall</i> pada $Re_1 = 1,6 \times 10^5$ dan $Re_2 = 6,4 \times 10^5$	18
Gambar 2.11	<i>Bend loss coefficients</i> (K) vs <i>Re</i> number pada <i>bend</i> ₂	20
Gambar 2.12	Vektor kecepatan aliran ke arah sumbu xy pada <i>cross section</i> 6,7, dan 8.....	22
Gambar 2.13	<i>Test Section</i> serta posisi <i>valve</i> $x/D=1$ dan sudut α	23
Gambar 2.14	Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran tanpa <i>elbow</i> dengan sudut $\alpha=0^\circ$	24
Gambar 2.15	Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran tanpa <i>elbow</i> dengan sudut $\alpha=30^\circ$	24
Gambar 2.16	Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran pada sudut $\alpha=0^\circ$ dengan <i>elbow</i>	24
Gambar 2.17	Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran pada sudut $\alpha=30^\circ$ dengan <i>elbow</i>	25
Gambar 2.18	Posisi pengambilan data pada <i>domain</i> uji	26
Gambar 2.19	Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen Untuk $\phi = 30^\circ$ ($z/Dh = 0.0$)	27
Gambar 2.20	Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $\phi = 60^\circ$ ($z/Dh = 0.0$).	27
Gambar 2.21	Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $x/Dh = 1.0$ and $z/Dh = 0.0$	28

Gambar 2.22	Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi <i>inner</i> dan <i>outer wall elbow</i> hasil simulasi dan eksperimen. .29
Gambar 3.1	Geometri <i>Ducting</i>41
Gambar 3.2	<i>Mesh</i> pada <i>Ducting</i>42
Gambar 3.3	<i>Domain</i> pemodelan dan kondisi batas dari <i>ducting</i>43
Gambar 3.4	Diagram alir penelitian44
Gambar 4.1	Penempatan posisi <i>cross-section</i>46
Gambar 4.2	Perkembangan <i>velocity profile</i> dan kontur kecepatan sepanjang aliran untuk $Re=2.05 \times 10^5$47
Gambar 4.3	Grafik <i>velocity profile</i> masing-masing posisi <i>cross-section</i> berdasarkan x/D_h : a). 0° ; b). 90° ; c).-1; d).0; e).1; f).2 ;g).3; h).10; i).1549
Gambar 4.4	Visualisasi vektor kecepatan di setiap <i>cross-section</i> untuk $Re = 2.05 \times 10^5$; $\alpha=0^\circ$51
Gambar 4.5	Visualisasi vektor kecepatan di setiap <i>cross-section</i> untuk $Re = 2.05 \times 10^5$; $\alpha=30^\circ$52
Gambar 4.6	Grafik <i>velocity profile</i> masing-masing posisi <i>cross-section</i> berdasarkan x/D_h : a). 0° ; b). 90° ; c).-1; d).0; e).1; f).2 ;g).3; h).10; i).15.....54
Gambar 4.7	Perkembangan <i>velocity profile</i> dan kontur kecepatan sepanjang aliran untuk $Re=8.2 \times 10^5$56
Gambar 4.8	Visualisasi vektor kecepatan di setiap <i>cross-section</i> untuk $Re = 8.2 \times 10^5$; $\alpha=0^\circ$58
Gambar 4.9	Visualisasi vektor kecepatan di setiap <i>cross-section</i> untuk $Re = 8.2 \times 10^5$; $\alpha=30^\circ$59

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Jaringan perpipaan merupakan instalasi yang sangat memegang peranan penting guna mendukung sebagian besar proses yang ada di industri, seperti yang kita ketahui pada pembangkit listrik, kilang minyak, distribusi gas alam, system pengondisian udara, dan lain-lain. Dalam system perpipaan selalu ada komponen yang disebut *fitting*, yang mempunyai koefisien *losses* dan menyebabkan *pressure drop* sepanjang aliran. Pada aplikasi tertentu diperlukan suatu system distribusi guna mengalirkan fluida dari suatu tempat ke tempat lain. Sepanjang system tersebut terdapat saluran pembelokan (*elbow*), semakin banyak belokan sepanjang saluran maka akan timbul kerugian energi yang semakin besar pula digunakan untuk mengalirkan fluida. Pada aplikasi tertentu yang menghendaki adanya pengaturan laju aliran massa, maka aliran tersebut pasti akan melewati suatu gangguan yang mungkin dapat menambah kerugian energi, artinya diperlukan energi yang besar untuk menanggulangi setiap kerugian yang terjadi di sepanjang instalasi.

Nilai *pressure drop* aliran yang mengalir pada *elbow* lebih besar daripada aliran yang mengalir pada saluran lurus dengan panjang yang sama. Hal tersebut dikarenakan aliran yang mengalir pada *elbow* mengalami kerugian akibat gesekan (*friction loss*) seperti halnya pada aliran yang mengalir dalam pipa lurus dan juga mengalami kerugian akibat separasi (*separation loss*) dan *secondary flow*. Separasi terjadi akibat perubahan arah aliran

fluida yang melalui saluran tersebut sehingga aliran tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* yang mengakibatkan aliran akan terpisah dan berbalik arah dari aliran utamanya dan membentuk *vortex*. Sedangkan *secondary flow* terjadi karena adanya perbedaan tekanan pada sisi *inner wall* dan *outer wall*. Perbedaan tekanan ini terlihat pada distribusi tekanan pada sisi *outer wall* lebih besar dibanding sisi *inner wall*, sehingga memungkinkan partikel fluida *outer wall* bergerak menuju *inner wall*. Gerakan partikel ini menyebabkan laju aliran fluida terhambat. *Pressure drop* yang terjadi pada suatu asesoris tambahan suatu instalasi akan berpengaruh pada aliran di dalamnya, akibatnya akan memberikan nilai koefisien tertentu sesuai sudut bukaan.

Upaya dalam mengamati fenomena aliran pada saluran berbentuk *octogonal elbow* 90° dengan radius ratio (r_m/D_h) 1.875 sudah dilakukan oleh [3]. Penelitian ini dilakukan dengan penambahan satu buah *guide vane* dan tanpa *guide vane*. Hasil yang didapatkan pada studi eksperimen dan numerik didapatkan profil kecepatan maksimum *elbow* berada pada sisi *inner* yang kemudian bergeser menuju *outer* seiring dengan semakin besarnya x/D_h dan ΔC_p antara *inlet* dan *outlet elbow* secara tidak langsung menunjukkan koefisien *minor losses* (K) pada *elbow*, dengan semakin kecilnya nilai koefisien *minor* maka semakin kecil juga nilai *headloss* pada *elbow* tersebut. Demikian juga pada penelitian yang dilakukan oleh.

Penelitian [2] adalah eksperimen pada pipa lurus yang diganggu oleh *butterfly valve*. Pipa tersebut memiliki diameter 0,3 m dan panjang 11D. Pengambilan data dilakukan pada bilangan Reynolds yang bervariasi rentangnya $5.0 \times 10^4 < Re < 10^6$, dilakukan dengan tambahan *elbow* 90° dan *butterfly valve* yang

di-setting kemiringan 0° (*fully open*) dan 30° . Hasil yang didapat melalui grafik profil kecepatan pada pipa lurus yang terdapat *valve* bahwa aliran akan mencapai *fully developed* lebih awal dari pada pipa lurus yang ditambahkan *elbow*, hal ini disebabkan karena pada *elbow* tersebut sudah terjadi aliran sekunder sebelum melalui *valve*.

Penelitian [7] adalah melakukan perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen. Simulasi ini dilakukan pada $Re = 40000$ menggunakan model turbulen RSM (*Reynolds Stress Model*) dengan variasi tiga kerapatan *mesh* yaitu, $V_k = 553\ 052$, $V_k = 1766\ 079$, and $V_k = 1034\ 775$, menghasilkan data berupa grafik profil kecepatan untuk lokasi $x/D_h = 1.0$ terdapat perbedaan signifikan pada masing-masing variasi kerapatan *mesh* dan yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada jumlah *mesh* 1034 775.

Dari beberapa penelitian di atas dilakukan penelitian lebih lanjut tentang karakteristik aliran melewati saluran seperti yang dilakukan [2] dan [7] yaitu saluran yang akan dipasang *elbow* dan *damper* pada sisi *inlet*. Penelitian dilakukan menggunakan metoda komputasi pada bilangan Reynolds, 2.05×10^5 dan 8.2×10^5 . *Damper* diletakkan pada jarak $x/D_h = 2$ dengan variasi bukaan *damper* 0° , 10° , 20° , dan 30° . Hasil yang diamati berupa profil kecepatan, dan visualisasi aliran.

1.2. Rumusan Masalah

Aliran fluida yang mengalir pada saluran sempit selalu mengalami *pressure drop* yang disebabkan oleh *friction* yang dipengaruhi oleh material pipa, juga dipengaruhi oleh fenomena aliran lain yang timbul akibat perbedaan tekanan, separasi aliran, dan aliran sekunder. Pada aliran yang melewati suatu gangguan, maka akan terjadi perubahan profil kecepatan dan berpengaruh

terhadap *pressure drop*. Untuk mengamati hal tersebut maka dirumuskanlah :

1. Bagaimana interaksi aliran di dalamnya yang ditempatkan sebuah *dampener* dengan variasi bukaan $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ dan 30° ?
2. Bagaimana fenomena aliran pada daerah *downstream* setelah ditempatkan *dampener* ?

1.3. Batasan Masalah

Pada penelitian ini diberikan beberapa batasan masalah sehingga pembahasan dalam penelitian ini tidak melebar dari tujuan awal. Maka dari itu, penelitian ini terbatas pada asumsi :

1. Pemodelan benda uji dilakukan dengan *software Gambit 2.4* untuk tahap *Pre-processing* dan *Fluent 6.3* untuk *Post processing*
2. Fluida yang mengalir adalah udara pada keadaan steady, *incompressible flow*, dan *fully developed*
3. Perpindahan panas yang timbulkan antara fluida dan permukaan saluran dapat diabaikan

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini yaitu guna mengetahui karakteristik aliran yang melalui suatu gangguan yang diletakkan pada jarak x/D_h tertentu pada saluran *rectangular*, namun tujuan khusus dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Simulasi numerik aliran melalui saluran udara *rectangular* yang tersusun atas *straight channel upstream*, *elbow*, dan *straight channel downstream* yang ditempatkan sebuah *dampener*.

2. Mengetahui profil kecepatan pada setiap *cross section* pada posisi setelah *damper*.
3. Mengetahui profil kecepatan sebelum *elbow* , pada *elbow*, dan setelah *elbow*
4. Mengetahui visualisasi aliran pada posisi setiap penampang setelah *damper*.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan didapat setelah melakukan penelitian ini sebagai berikut :

1. Memberikan gambaran tentang fenomena aliran yang melewati suatu saluran berpenampang *rectangular* yang diletakkan bodi pengganggu di dalamnya
2. Memberikan penjelasan tentang pengaruh variasi sudut kemiringan bodi pengganggu dan bilangan Reynolds terhadap karakteristik aliran

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

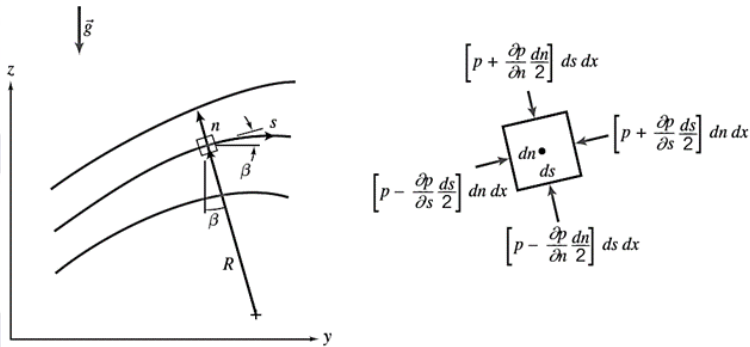
Pada bab ini akan dijelaskan mengenai teori-teori yang berhubungan dengan penelitian ini yang mendukung. Teori ini digunakan sebagai landasan untuk menganalisis dalam penelitian ini.

2.1 Persamaan Euler Dalam Koordinat *Streamline*

Pada sebuah aliran tunak, aliran fluida di sepanjang *streamline* setiap partikel fluida yang berurutan melewati titik tertentu akan mengikuti lintasan yang sama. Dalam aliran tunak sebuah partikel fluida akan bergerak di sepanjang *streamline* dikarenakan untuk *steady flow*, *pathlines* dan *streamline* berlangsung dengan bersamaan. Dari persamaan Euler dibangun persamaan gerak yang dinyatakan dalam koordinat *streamline* untuk *inviscid flow*.

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad (2.1)$$

Untuk memperjelas, dapat dilihat aliran pada bidang yz seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Persamaan gerak dituliskan dalam koordinat s (jarak disepanjang *streamline*) dan juga koordinat n (jarak normal terhadap *streamline*). Tekanan di pusat dari element adalah p .



Gambar 2.1 Gerakan partikel fluida di sepanjang *streamline* [1]

Untuk *steady flow* dan mengabaikan *body forces*, persamaan Euler di sepanjang *streamline* ke arah *s* dinyatakan sebagai berikut,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.2)$$

persamaan (2.2) tersebut menunjukkan hubungan antara kecepatan dengan tekanan, yang mana apabila terjadi penurunan kecepatan maka terjadi peningkatan tekanan, begitu pula sebaliknya. Hal ini sangat sesuai dengan hukum kekekalan energi, yang menyatakan bahwa apabila suatu aliran ideal tanpa gesekan dijumlahkan antara komponen tekanan dan kecepatannya pada setiap titik, maka hasilnya adalah sama.

Untuk persamaan gerak ke arah *n* dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.3)$$

persamaan (2.3) menunjukkan bahwa terjadi peningkatan tekanan ke arah luar dari lengkungan *streamline*. Hal ini dapat terjadi dikarenakan gaya yang bekerja pada partikel hanyalah gaya dari

tekanan, medan tekanan menyebabkan percepatan sentripetal. Pada daerah *streamline* yang lurus atau radius kelengkungannya (R) tak terhingga maka tidak ada perbedaan antara tekanan normal terhadap *streamline* lurus.

2.2 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan salah satu faktor dalam proses terbentuknya suatu aliran. Semakin besar bilangan Reynolds, maka aliran yang terbentuk akan semakin turbulen. Aliran turbulen memiliki bentuk lebih blunt dibandingkan dengan aliran laminar, sehingga momentum aliran turbulen di dekat dinding lebih besar. Hal ini mengakibatkan aliran lebih tahan terhadap tegangan geser dan adverse pressure gradient. Persamaan bilangan Reynolds dapat dituliskan sebagai berikut,

$$Re_{Dh} = \frac{\rho \cdot U_{ref} \cdot D_h}{\mu} \quad (2.4)$$

dimana:

- ρ : massa jenis fluida
- U_{ref} : *central velocity* fluida pada inlet *test section*
- D_h : diameter hidrolis
- μ : viskositas kinematis fluida

2.3 Pressure Coefficient (C_p)

Dalam sistem *ducting*, sistem perpipaan, atau model pengujian lainnya, sering kali dilakukan modifikasi parameter, $\Delta p / \rho V^2$, dengan memasukkan faktor $\frac{1}{2}$ untuk membuat

denominator menyediakan tekanan dinamik. Maka terbentuklah rasio berikut,

$$C_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2.5)$$

dimana Δp adalah tekanan lokal dikurangi dengan tekanan *freestream*, ρ dan V adalah properti dari aliran *freestream*. Rasio ini merupakan rasio antara gaya tekanan terhadap gaya inersia, dan rasio ini disebut dengan *Euler number*. *Euler number* sering disebut dengan *pressure coefficient*, C_p .

Dalam pengujian suatu model, *pressure coefficient* secara tidak langsung digunakan untuk menyatakan besarnya *pressure drop*. *Pressure coefficient* pada *elbow* didefinisikan sebagai selisih antara tekanan statis pada dinding dengan tekanan statis referensi dibagi dengan dinamis yang diukur pada inlet.

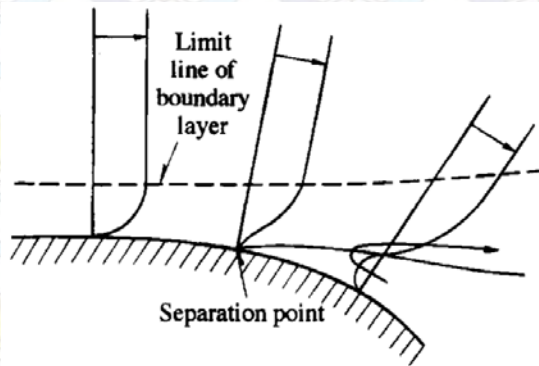
2.4 Aliran di Dalam Pipa

Pada sistem *ducting* ataupun perpipaan, *elbow* merupakan bagian yang menyebabkan terjadinya *pressure drop* yang cukup besar. Hal tersebut dikarenakan adanya perubahan arah aliran fluida yang dapat menyebabkan terjadinya separasi dan juga *secondary flow*. Akan dijelaskan lebih lanjut tentang mekanisme terjadinya separasi dan *secondary flow* di dalam elbow.

2.4.1 Mekanisme Terjadinya Separasi Aliran

Dalam sebuah aliran dimana tekanan mengalami penurunan searah dengan arah aliran, fluida akan mengalami percepatan dan lapisan batas menipis. Dalam suatu saluran yang mengalami kontraksi, tekanan memiliki gradien yang negatif yang dapat membuat aliran stabil sementara itu turbulensi secara bertahap menurun. Sebaliknya, hal-hal yang sangat berbeda dalam aliran

yang memiliki gradien tekanan yang positif dimana tekanan meningkat searah dengan arah aliran, seperti pada aliran divergen atau aliran pada dinding yang melengkung seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Separasi lapisan batas [4]

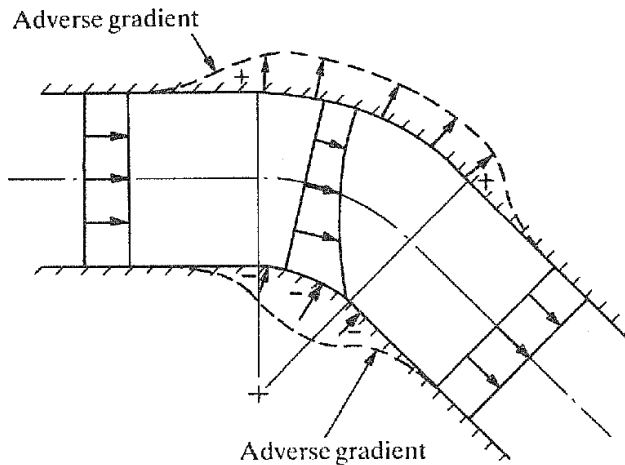
Pada gambar 2.2, terlihat bahwa fluida yang berjarak cukup jauh dari dinding memiliki kecepatan yang tinggi dan juga inersia yang besar. Oleh karena itu, aliran dapat melanjutkan ke arah *downstream* dan mampu juga untuk menghadapi tekanan *downstream* yang tinggi. Sedangkan fluida yang berdekatan dengan dinding memiliki kecepatan yang rendah, sehingga tidak dapat mengatasi tekanan untuk mencapai *downstream* karena hanya memiliki inersia yang kecil pula. Dengan demikian kecepatan aliran menjadi lebih kecil dan lebih kecil lagi hingga pada akhirnya gradien kecepatannya menjadi nol. Titik ini disebut sebagai titik separasi.

Setelah terjadinya separasi, gradien kecepatan menjadi negatif sehingga menghasilkan aliran balik (*backflow*). Dalam

area sekitar titik separasi, suatu vortisitas akan berkembang dan aliran akan menjadi turbulen. Berkembangnya vortisitas menyebabkan terbentuknya *vortex*, adanya *vortex region* akan mengurangi luas penampang efektif yang dilalui aliran utama, sehingga aliran mengalami percepatan. Akibatnya terjadilah *pressure drop*. Untuk alasan ini, kerugian energi menjadi meningkat. Fenomena seperti inilah yang terjadi pada sebuah *elbow*, pada *elbow* aliran salah satu dinding akan menjauhi arah aliran, bahkan dapat terjadi dengan tiba-tiba.

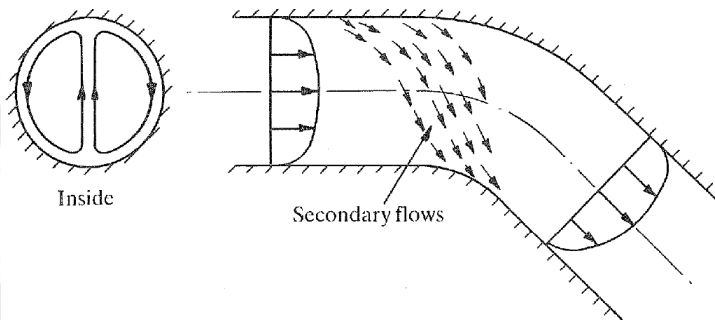
2.4.2. Mekanisme Terjadinya Aliran Sekunder Di Dalam *Elbow*

Aliran yang melalui *elbow* tentunya akan berubah arah, begitu pula dengan tekanan statis dan distribusi kecepatannya pun akan ikut berubah, setidaknya dua *adverse pressure gradient* akan timbul seperti yang terlihat pada gambar 2.3. Setelah itu aliran sekunder akan muncul dan lengkungan akan menyebabkan turbulensi pada struktur aliran.



Gambar 2.3 Aliran ideal melalui belokan [5]

Pada *elbow*, kecepatan bervariasi dari nol pada dinding hingga maksimum pada daerah inti, aliran aktual melalui belokan melibatkan distribusi energi yang tidak *uniform*. Perbedaan distribusi ini terjadi pada sisi *inner* dan *outer wall*, hal ini terjadi terjadi karena semakin kesisi luar maka tekanan statis akan semakin besar. Perbedaan tekanan pada kedua sisi inilah yang menyebabkan aliran yang melewati *elbow* tidak sepenuhnya mengikuti aliran utama. Aliran sekunder ini merupakan fenomena aliran tiga dimensi seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Aliran Sekunder [5]

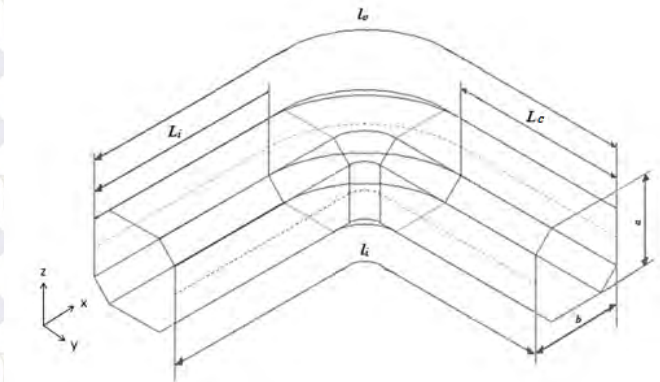
Namun lain halnya dengan aliran sekunder yang terjadi pada *square elbow*. Pada *square elbow* mempunyai karakter khusus jika dibandingkan *circular elbow* dengan terjadinya aliran sekunder pada sisi sudut. Aliran sekunder terjadi karena pada *square elbow* terjadi *boundary layer* pada sisi bawah dan samping sedangkan pada *circular elbow* tidak dijumpai. Interaksi *boundary layer* yang berkembang pada sisi bawah dan samping inilah yang menyebabkan terjadinya aliran sekunder.

Penelitian guna mengamati karakteristik aliran melalui *T-junction* sudah dilakukan sebelumnya. Beberapa penelitian

menggunakan metoda eksperimen dan komputasi, variasi yang digunakan dengan meletakkan gangguan berupa *valve* pada jarak tertentu. Berikut penelitian-penelitian yang sudah ada.

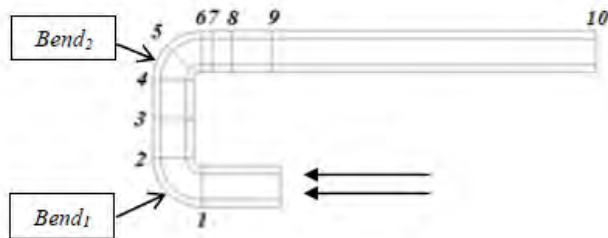
2.5. Penelitian Aliran Yang Melalui *U-Bend*

Louis (2015) telah melakukan studi numeric mengenai fenomena aliran tiga dimensi yang melalui *U-Bend* berpenampang *octagonal* tanpa *guide vane*. Simulasi dilakukan dengan turbulen model *k-ε Realizable*, *discretization second order* untuk *pressure*, *second-order upwind* untuk *momentum*, *turbulence kinetic energy* dan *turbulence dissipation rate*., fluida kerja udara dengan *density* (ρ) 1,182 kg/m³ dan *viskositas* (μ) 1,848 x 10⁻⁵ N.s/m² dalam 4 macam bilangan Reynolds, yaitu sebesar 1,6 x 10⁵ ; 2,4 x 10⁵; 4,8 x 10⁵; dan 6,4 x 10⁵. Berikut adalah gambar geometri *isometric view* dari *elbow 90° section* beserta penempatan posisi *guide vane* seperti pada gambar 2.5 dan 2.7

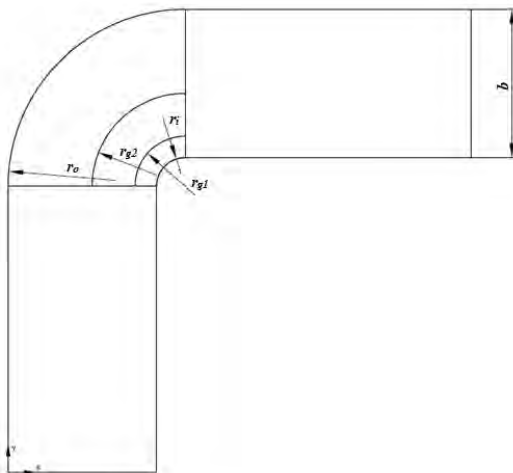


Gambar 2.5. Elbow 90° section [3]

Hasil yang didapat terdiri dari distribusi profil kecepatan, visualisasi besar kecepatan pada kontur, vector kecepatan penampang melintang, distribusi koefisien tekanan, *loss coefficient*. Terlihat bahwa pada aliran melalui *modified octagonal U-bend* tanpa menggunakan *guide vane* terjadi *back flow* pada *cross section* 3 dan 7. *Back flow* mengindikasikan adanya *vortex* di sisi *inner wall*, tentunya hal tersebut merugikan karena akan mengurangi luas aliran efektif.



Gambar 2.6. Penempatan posisi *cross section* [3]



Gambar 2.7. Elbow 90° section tampak atas [3]

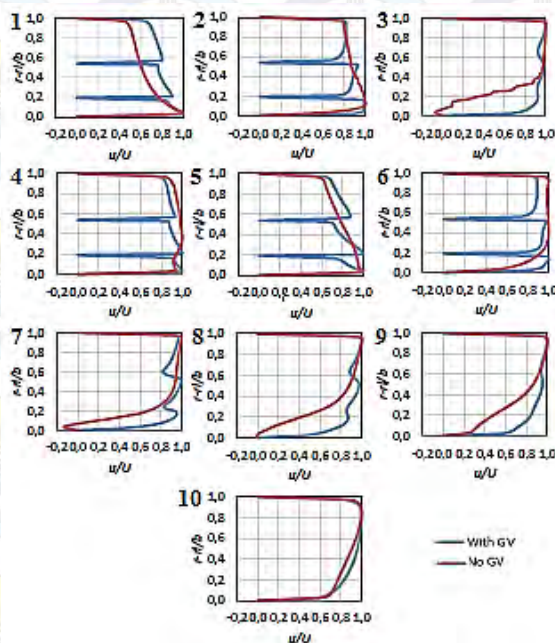
- *Bend* : modified octagonal U-bend
- Panjang inlet bend (L_i) : 1000 mm
- Panjang straight channel (L_s) : 1000 mm
- Panjang outlet bend (L_o) : 5000 mm
- Tinggi dan lebar ($a \times b$) : 518,8×518,8 mm
- Inner radius (r_i) : 100 mm
- Outer radius (r_o) : 618,8 mm
- Guide vane 1 radius (r_{g1}) : 175 mm
- Guide vane 2 radius (r_{g2}) : 325 mm
- Hydraulic diameter (D_h) : 409 mm

Berdasarkan gambar 2.8 yang menunjukkan perbandingan grafik profil kecepatan dengan dan tanpa *guide vane* pada setiap *cross-section* dapat diketahui bahwa dengan penambahan *guide vane* akan menyebabkan aliran keluar menjadi lebih seragam, hal tersebut menguntungkan karena akan mengurangi *noise*. Semakin menjauhi *bend*, kecepatan maksimum kembali terdefleksi menuju sisi *outer*. Selanjutnya profil kecepatan mengalami proses *recovery* (*recovery process*) untuk mencapai kondisi normal, sebagaimana profil kecepatan pada *straight duct*. Proses *recovery* dilakukan untuk mencapai kestabilan profil pada sisi *inner* dan *outer*.

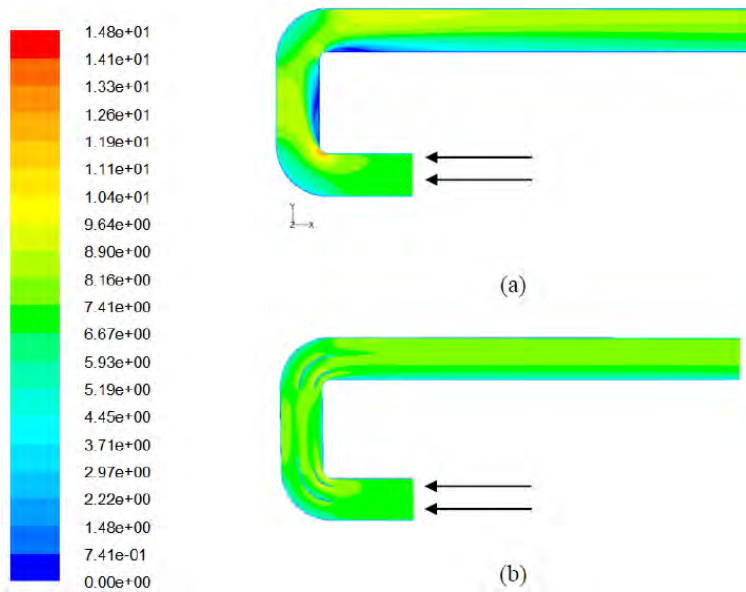
Gambar 2.9 yang menunjukkan informasi tentang kontur kecepatan meliputi dua *bend* untuk variasi dengan dan tanpa *guide vane* serta variasi bilangan Reynolds. Gambar 2.10 memberikan informasi tentang karakteristik aliran dengan mengacu kepada distribusi *wall pressure coefficient* (C_p) sebagai representasi dari distribusi tekanan.

Perbedaan nilai C_p antara *inner* dengan *outer wall* secara tidak langsung menunjukkan potensi terjadinya aliran sekunder didalam *bend* itu sendiri. Semakin besar perbedaan nilai C_p antara *inner* dengan *outer* maka semakin besar pula potensi terjadinya *secondary flow* sebaliknya semakin kecil nilai perbedaannya maka akan semakin kecil pula potensi terjadinya *secondary flow* pada *bend*.

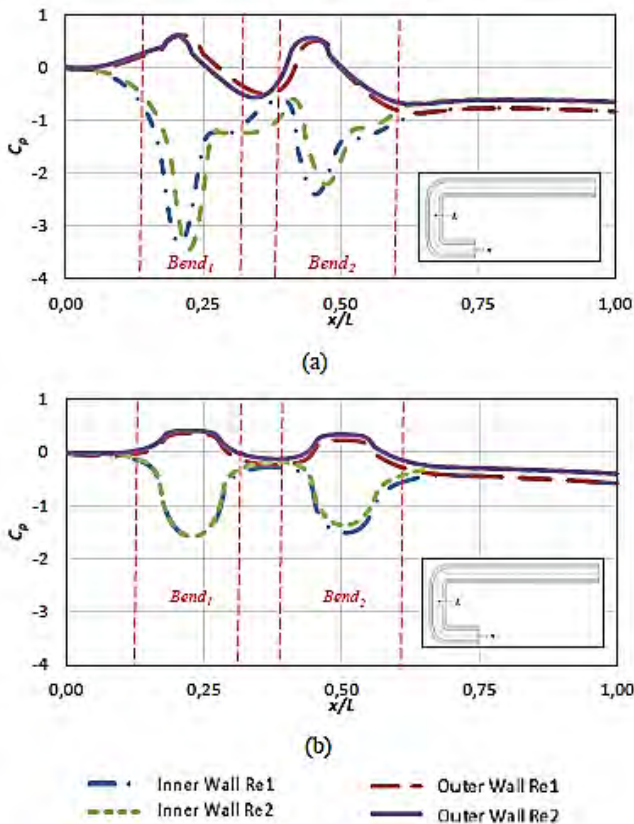
Dengan bilangan *Reynoldss* yang sama maka ΔC_p yang paling rendah terdapat pada *bend* dengan *guide vane* dan ΔC_p yang paling tinggi terdapat pada *bend* dengan tanpa *guide vane*. Perbedaan nilai C_p antara *inlet* dan *outlet bend* disebut dengan *bend loss coefficients* (K).



Gambar 2.8. Distribusi profil kecepatan (m/s) di setiap *cross section* dengan dan tanpa *guide vane* [3]



Gambar 2.9. *Velocity (m/s) magnitude contour bend (a) tanpa guide vane dan (b) dengan guide vane [3]*



Gambar 2.10. Distribusi C_p inner dan outer wall pada $Re_1 = 1,6 \times 10^5$ dan $Re_2 = 6,4 \times 10^5$ untuk variasi (a) tanpa guide vane dan (b) dengan guide vane [3]

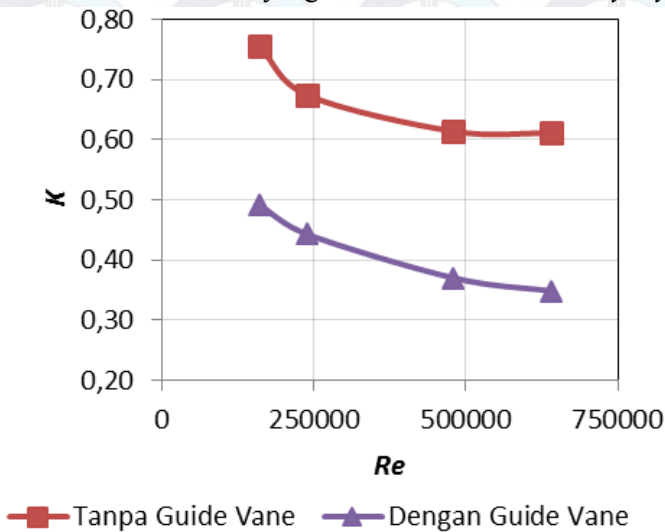
Pada tabel 2.10. menunjukkan data tentang pengaruh variasi bilangan Reynolds terhadap nilai K dan ΔC_p terlihat bahwa nilai ΔC_p (inner-outer) tidak berubah secara signifikan seiring dengan peningkatan bilangan

Reynolds. Peneliti [9] menyatakan bahwa pada penelitiannya ketika nilai $Re < 100$, tidak terjadi aliran balik dan separasi. Ketika $Re > 100$, muncul *vortex* dan separasi aliran serta berkembang lebih besar lagi. Lalu ketika $Re > 1000-1500$, bentuk dan ukuran dari *inner* dan *outer vortices* menjadi hampir konstan. Pada penelitian ini diduga bilangan Reynolds yang digunakan telah mencapai batas dimana sudah tidak akan ada perkembangan *vortex* lebih lanjut, sedangkan timbulnya *vortex* diawali oleh adanya ΔC_p (*inner-outer*).

Tabel 2.1 Perbandingan nilai K dan ΔC_p (*inner-outer*) dari hasil penelitian numerik pada $bend_2$ [3]

Variasi	Bilangan Reynolds	K_{bend2}	ΔC_p (<i>inner-outer</i>)
Tanpa <i>guide vane</i>	$1,6 \times 10^5$	0,7559	2,9084
	$2,4 \times 10^5$	0,6737	2,8946
	$4,8 \times 10^5$	0,6140	2,7436
	$6,4 \times 10^5$	0,6109	2,7701
	$1,6 \times 10^5$	0,4916	1,7490
Dengan <i>guide vane</i>	$2,4 \times 10^5$	0,4427	1,7511
	$4,8 \times 10^5$	0,3704	1,7215
	$6,4 \times 10^5$	0,3487	1,7028

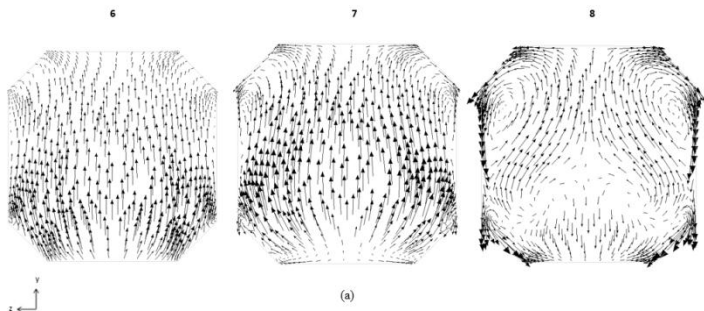
Seperti yang terlihat pada gambar 2.11 menunjukkan grafik Re vs K , penambahan *guide vane* dapat menurunkan nilai K secara signifikan. Selain itu peningkatan bilangan Reynolds menyebabkan penurunan nilai K , hal ini disebabkan karena kemampuan aliran dalam melawan *adverse pressure* semakin tinggi. Namun pada bilangan Reynolds tertentu, peningkatan bilangan Reynolds sudah tidak akan menyebabkan penurunan nilai K secara signifikan. Penurunan nilai koefisien losses ini dipengaruhi oleh berkurangnya aliran sekunder yang mengalir sepanjang *elbow* karena penambahan *guide vane* didalamnya. Terbentuknya aliran sekunder ini ditimbulkan oleh gerak kombinasi elemen fluida yang berada didalam *boundary layer*.

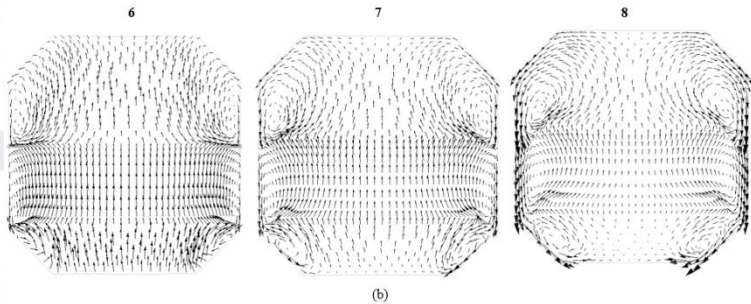


Gambar 2.11. Bend loss coefficients (K) vs Re number pada $bend_2$ [3]

Elemen fluida didalam *boundary layer* selain melakukan gerak translasi juga melakukan gerak rotasi. Gerakan rotasi disebabkan karena adanya efek viskositas dan gradient kecepatan. Tepat di dinding kecepatan elemen fluida adalah nol, semakin menjauhi dinding nilai kecepatannya semakin besar. Kondisi ini memungkinkan seolah-olah aliran berotasi di dalam pengembangan dua *boundary layer* pada arah yang berbeda akan menghasilkan *vortex* yang terpilin. Dengan adanya *vortex* terpilin dari aliran sekunder maka akan mengakibatkan *pressure drop* aliran. *Vortex* terpilin ini dapat mengurangi *effective flow area* dan menyebabkan terjadinya *blockage effect*.

Gambar 2.12 memberikan gambaran tentang aliran sekunder di setiap *cross-section*. Pada gambar 12 (a) dapat terlihat bahwa terdapat adanya unsur kecepatan ke arah sumbu y yang cukup besar yakni dari sisi *inner wall* ke *outer wall*, hal ini menunjukkan adanya aliran sekunder. Hal tersebut menyebabkan adanya *vortex* tepat setelah daerah *bend₂* pada sisi *inner wall*. Selain itu juga terdapat adanya aliran sekunder di kedelapan sudut dari *octagonal bend₂*, namun aliran sekunder yang terjadi masih lebih baik bila dibandingkan dengan aliran sekunder yang terjadi pada siku *rectangular bend*. menjauhi *bend₂* komponen kecepatan ke arah y positif akan membesar lalu akan mengecil.



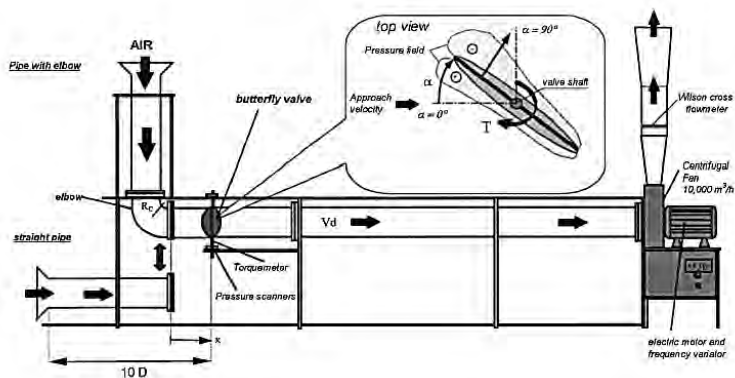


Gambar 2.12. Vektor kecepatan aliran ke arah sumbu xy pada *cross section* 6,7, dan 8 untuk (a) tanpa *guide vane* dan (b) dengan *guide vane* [3]

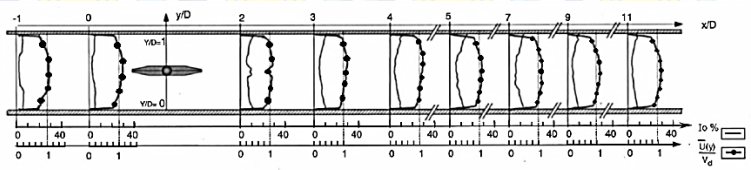
Pada gambar 2.12 (b) dapat terlihat bahwa terdapat adanya unsur kecepatan ke arah sumbu z pada sisi *inner wall* ke *outer wall*, hal ini menunjukkan adanya aliran sekunder, namun pada *bend* dengan *guide vane* aliran sekunder tersebut tidak sampai menyebabkan adanya *vortex* pada sisi *inner wall*. Seperti halnya *bend* tanpa *guide vane*, terdapat pula adanya aliran sekunder di kedelapan sudut dari *octagonal bend*, namun aliran sekunder yang terjadi di sudut pada *bend* dengan *guide vane* lebih banyak dibandingkan dengan tanpa *guide vane*. Hal ini dikarenakan penambahan *guide vane* menyebabkan semakin banyak adanya *sudut* pada saluran. Seperti yang terlihat pada gambar 10 (b), semakin menjauhi *bend* komponen kecepatan ke arah y dan z akan semakin kecil.

2.6. Karakteristik Aliran Yang Melewati Saluran Dengan *Butterfly Valve* Sebagai Body Pengganggu

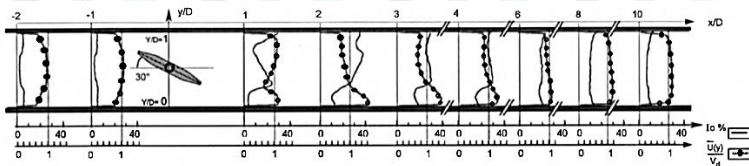
Danbon dan Sollicec (1999) melakukan eksperimen pada saluran berpenampang *circular* yang di dalamnya dipasang *butterfly valve* sebagai pengontrol laju aliran fluida, dengan memanfaatkan torsi yang dihasilkan oleh gaya-gaya aerodinamisnya akan membuka atau menutup seiring bertambah atau berkurangnya laju aliran massa. Eksperimen dilakukan pada kecepatan 40 m/s dan intensitas turbulen 2%, *valve* diletakkan di posisi $x/D=1$ dengan variasi $\alpha=0^\circ$ dan $\alpha=30^\circ$ serta bilangan Reynolds $5.0 \times 10^4 < Re < 10^6$, seperti yang terlihat pada gambar 2.13. Kemudian hasil yang diperoleh adalah profil kecepatan dan profil intensitas turbulen yang digambarkan berupa *dotlines* dan *solidlines*, seperti yang ditunjukkan berturut-turut pada gambar 2.14; 2.15; 2.16; 2.17.



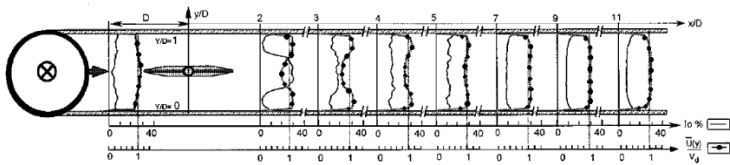
Gambar 2.13. Test Section serta posisi valve $x/D=1$ dan sudut α .
[2]



Gambar 2.14. Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran tanpa *elbow* dengan sudut $\alpha=0^\circ$. [2]



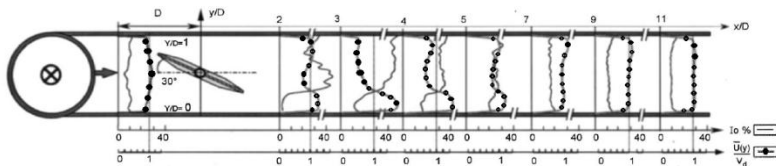
Gambar 2.15. Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran tanpa *elbow* dengan sudut $\alpha=30^\circ$. [2]



Gambar 2.16. Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran pada sudut $\alpha=0^\circ$ dengan *elbow*. [2]

Ketika *valve* dipasang secara *fully open* (0°) dengan *elbow* seperti pada gambar 2.16 terlihat ada perubahan yang signifikan terhadap profil kecepatan sesaat setelah melalui *valve*, diketahui bahwa nilai $\frac{\bar{U}(y)}{V_d} < 1$ pada *centreline* ($y/D=0,5$) namun akan berangsur-angsur kembali *fully developed* pada $x/D=12$, dibanding dengan tanpa *elbow* yang mengalami sedikit gangguan

sesaat sebelum melalui *valve*, kemudian mencapai *fully developed* lebih cepat seperti yang terlihat pada gambar 2.14.



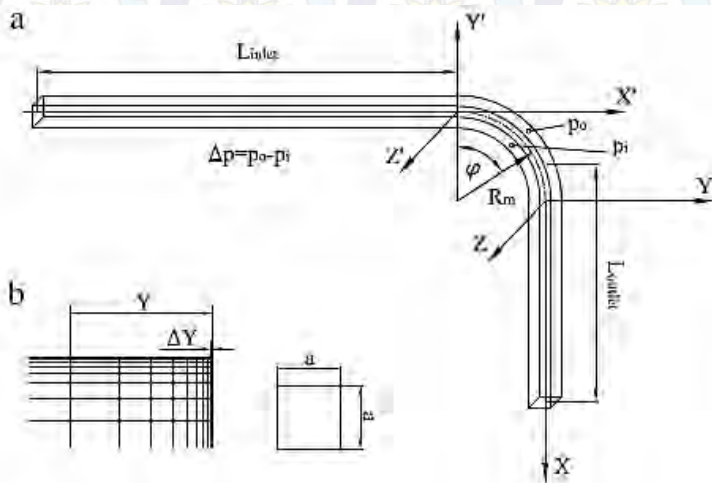
Gambar 2.17. Profil kecepatan dan intensitas turbulen pada medan aliran pada sudut $\alpha=30^\circ$ dengan *elbow*. [2]

Berbeda juga pada sudut kemiringan 30° tanpa *elbow* (gambar 2.15) yang dapat mencapai *fully developed* lebih cepat pada $x/D = 11$ dibanding saluran dengan *elbow* (gambar 2.17) yang kembali *fully developed* pada $x/D=12$. Hal ini disebabkan karena pada saluran yang terpasang *elbow* sudah mengalami gangguan akibat aliran sekunder di dalamnya, kemudian sesaat setelah melewati *elbow* terdapat *blockage effect* berupa *valve* sehingga seolah-olah gangguan tersebut terakumulasi akibatnya aliran tertunda mencapai *fully developed*. Secara keseluruhan, untuk aliran yang melalui *valve* bukaan 30° akan lebih cepat kembali normal dari pada *fully open*, disebabkan oleh *blockage effect* yang lebih besar akan memberikan momentum tambahan untuk melawan gaya gesernya.

2.7. Karakteristik Aliran Melalui Rectangular Duct Dengan Elbow 90°

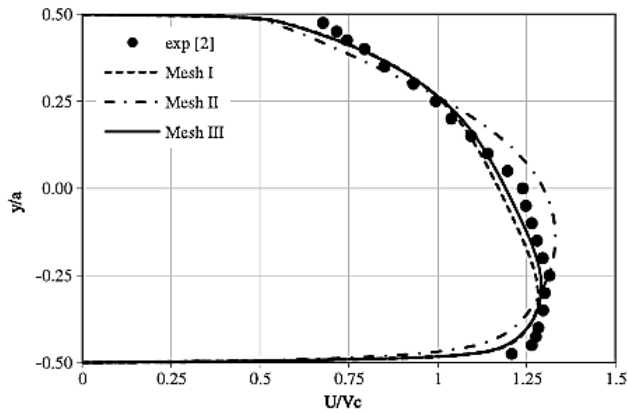
Dalam menganalisa karakteristik aliran melalui *rectangular duct* seperti yang dilakukan secara simulasi dan

eksperimen oleh **Rup dan Sarna (2011)**. Simulasi ini menggunakan model turbulen RSM (*Reynolds Stress Model*) dilakukan pada $Re = 40000$ yang memiliki ukuran geometri $a \times a = 80 \times 80$ mm, $D_h = 80$ mm dan $L_{inlet} = L_{outlet} = 20D_h = 1600$ mm seperti yang terlihat pada gambar 2.17. Variasi yang dilakukan pada kerapatan *meshing*, dengan jumlah mesh $V_k = 553\ 052$, $V_k = 1766\ 079$, and $V_k = 1034\ 775$

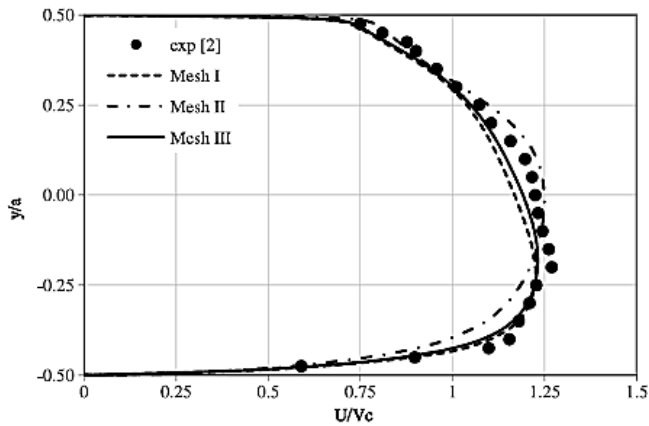


Gambar 1.17. a) Posisi pengambilan data pada *domain* uji b) Mesh pada *Volume*. [7]

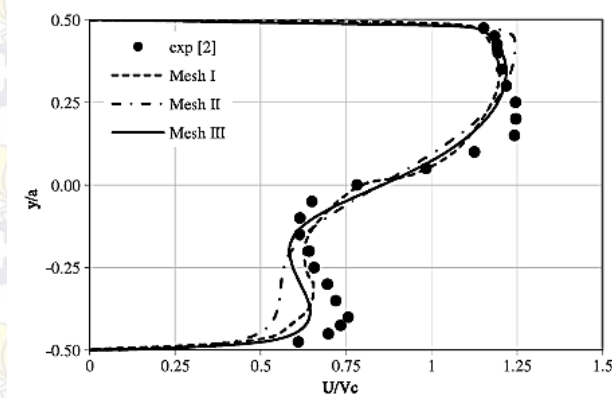
Hasil yang didapatkan yaitu membandingkan hasil eksperimen dan simulasi profil kecepatan pada jarak tertentu dan koefisien tekanan pada aliran sepanjang *elbow*.



Gambar 2.18. Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen Untuk $\phi = 30^\circ$ ($z/Dh = 0.0$). [7]



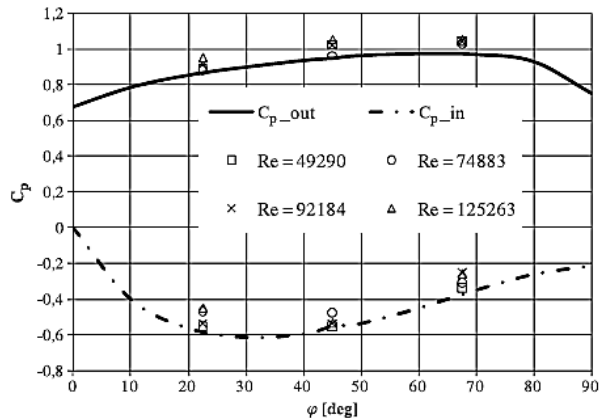
Gambar 2.19. Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $\phi = 60^\circ$ ($z/Dh = 0.0$). [7]



Gambar 2.20. Perbandingan profil kecepatan didapat dari simulasi dan eksperimen untuk $x/Dh = 1.0$ and $z/Dh = 0.0..$ [7]

Pada gambar 2.18 dan 2.19, mendeskripsikan bahwa hasil yang didapat dari simulasi mendekati hasil eksperimen untuk profil kecepatan sepanjang *elbow* pada lokasi $\phi = 30^\circ$ dan 60° . Terdapat perbedaan yang jelas terlihat pada gambar 2.20 yang menunjukkan profil kecepatan pada dengan lokasi $x/Dh = 1.0$ and $z/Dh = 0.0$ hanya satu simulasi yang mendekati hasil eksperimen yaitu pada variasi *mesh* III ($Vk = 1034775$).

Gambar 2.21 memberikan informasi tentang distribusi koefisien tekanan pada *elbow* yang, dapat diamati bahwa koefisien tekanan maksimum di dinding *elbow* terjadi pada *cross-section* yang terletak pada sudut $\phi = 45^\circ$ ($Z = 0.00$). Perbedaan tekanan ini menjadi parameter untuk menentukan besar koefisien losses pada *elbow* tersebut



Gambar 2.21. Perbandingan koefisien tekanan pada kedua sisi *inner* dan *outer wall elbow* hasil simulasi dan eksperimen. [7]

2.8. Grid Independency

Dalam melakukan studi numerik akan optimal apabila memperhatikan *grid independency*. Grid independency merupakan solusi konvergen yang ditentukan dari perhitungan CFD yang tidak dipengaruhi oleh besar kecilnya mesh. Jadi dengan meningkatkan jumlah dari sel maka kemungkinan tidak akan mengubah dari *integrated quantities* dan *flow-filed solution*. *Grid independency* diindikasikan dengan menghaluskan *mesh*, hal tersebut terus dilakukan hingga solusi numerik yang dihasilkan sudah tidak terdapat perubahan secara signifikan.

2.9. Model Turbulensi

Sebuah *turbulence model* adalah prosedur komputasi untuk mendekati sistem dari persamaan *mean flow*. Untuk sebagian besar aplikasi di dunia keteknikan, tidaklah perlu untuk melihat hasil detail dari fluktuasi turbulen, yang diperlukan

hanyalah untuk mengetahui bagaimana turbulensi memberikan dampak terhadap *mean flow*. Oleh karena itu *turbulence model* haruslah secara luas dapat diaplikasikan, akurat, sederhana, dan ekonomis untuk dijalankan.

2.9.1. Model $k-\varepsilon$

Model $k-\varepsilon$ merupakan model turbulen dengan menggunakan dua persamaan, sehingga memungkinkan kecepatan turbulen dan skala panjang ditentukan secara independen. Model $k-\varepsilon$ difokuskan untuk mekanisme yang memberikan efek terhadap energi kinetik turbulen (per satuan massa) k . Lalu ε merupakan laju disipasi dari k .

- **Standard $k-\varepsilon$:** Pemodelan ini menggunakan persamaan *transport* dalam penyelesaian model untuk model untuk k dan ε . Model ini dapat digunakan untuk menyelesaikan *bouyancy*, *heating*, dan *compressibility*. Model ini tidak sesuai untuk aliran kompleks yang meliputi separasi dan *strong stream curvature*.
- **RNG (Renormalization-group) $k-\varepsilon$:** Pemodelan ini merupakan variasi dari model *standard $k-\varepsilon$* . Model ini sesuai untuk aliran yang mempunyai bilangan Reynolds rendah dan untuk memprediksi aliran dengan efek *swirling*.
- **Realizable $k-\varepsilon$:** Pemodelan ini mempunyai beberapa batasan matematis pada bilangan Reynolds, namun konsisten dengan bentuk fisik aliran turbulen. Model ini mempunyai kelebihan yaitu lebih akurat untuk memprediksi laju penyebaran fluida dari pancaran suatu *jet* atau *nozzle*. Dengan menggunakan model ini dapat memberikan performa bagus untuk aliran yang

melibatkan putaran, separasi, *recirculation*, dan lapisan batas yang mempunyai gradien tekanan yang besar.

2.9.2. Model $k-\omega$

Model ini termasuk model yang menggunakan dua persamaan dalam pemodelannya. Dalam model ω ini, sebuah *inverse time scale* terkait dengan turbulensi. Karakteristik numerik dari model ini cukup serupa dengan model $k-\varepsilon$. Dalam model ini ω merupakan *specific dissipation rate*.

- **Standard $k-\omega$:** Pemodelan ini menggunakan dua persamaan *transport model* untuk memecahkan k dan ω . Model ini juga dapat digunakan untuk aliran dengan bilangan Reynolds yang rendah. Model ini dapat menampilkan transisi aliran dari yang awalnya laminar menjadi turbulen. Lalu model ini juga dapat pula menghitung *free shear* dan aliran *compressible*.
- **SST (*Shear-stress transport*) $k-\omega$:** Model ini merupakan variasi dari model *standard $k-\omega$* yang dikembangkan untuk memadukan formulasi model *standard $k-\omega$* yang stabil dan akurat pada daerah di dekat dinding dengan model $k-\omega$ yang memiliki keunggulan dalam aliran *free stream*.

2.9.3. Reynolds stress model (RSM)

Model ini menggunakan tujuh persamaan dalam pendekatannya, sehingga merupakan model turbulensi yang paling teliti. RSM mendekati persamaan RANS dengan menyelesaikan persamaan *transport* tambahan untuk enam *independent Reynolds stresses*. RSM akurat untuk memprediksi aliran kompleks seperti aliran *cyclone*, aliran berotasi, dan aliran yang terseparasi berat.

2.10. Perbandingan Berbagai Model Turbulensi Pada *Bend*

Nur Ikhwan (2009) [6] telah melakukan komparasi aliran melewati rectangular elbow dengan menggunakan model turbulensi Spallart-Allmaras, $k-\omega$, $k-\varepsilon$, dan *Reynolds Stress Model* (RSM).

Tabel 2.1 *Error* dalam memprediksi tekanan statis melalui 90° rectangular bend pada masing masing permodelan turbulensi [6]

No	Hasil Eksperimen/Simulasi	% Error
1	Eksperimen (Eddy, 2000)	-
2	Spalart-Allmaras	7,53
3	$k-\varepsilon$ Standard	4.52
4	$k-\varepsilon$ RNG	4,66
5	$k-\varepsilon$ Realizable	4,39
6	$k-\omega$ Standart	5,76
7	$k-\omega$ SST	4,99
8	RSM	4,44

Dari informasi pada tabel 2.2. yang menunjukkan nilai *error* pada masing-masing model turbulen, dari ketujuh model turbulensi yang digunakan untuk memprediksi tekanan statis dinding 90° rectangular bend, dapat terlihat bahwa yang memiliki hasil paling baik adalah model turbulensi *Realizable $k-\varepsilon$* . Model *Realizable $k-\varepsilon$* dikatakan yang terbaik karena memiliki persentasi *error* yang terkecil, sebab model turbulen tersebut dapat

memprediksi aliran sekunder yang terdapat pada masing-masing sudut pada *ducting* sehingga dapat dikatakan lebih akurat dibandingkan model turbulensi yang lain dalam simulasi aliran pada 90° *rectangular bend*.

2.11. Intensitas Turbulensi

Intensitas turbulensi, I , didefinisikan sebagai perbandingan antara akar rata-rata dari fluktuasi kecepatan u' terhadap kecepatan rata-rata u_{avg} . intensitas turbulen 1% atau kurang dikategorikan rendah, sedangkan 10% atau lebih dikategorikan tinggi

Untuk aliran internal, intensitas turbulensi pada sisi masuk bergantung pada kondisi aliran sebelum sisi masuk. Jika aliran sisi masuk belum berkembang penuh (*under-developed*) dan tidak terganggu, dapat digunakan intensitas turbulen rendah. Untuk aliran berkembang penuh (*fully-developed*) nilai intensitas turbulen bernilai lebih tinggi beberapa persen. Intensitas turbulen pada aliran berkembang penuh dapat diperkirakan sebagai :

$$I = \frac{u'}{u_{avg}} = 0,16 Re_{DH}^{-1/8}$$

Hubungan antara energy kinetic turbulen, k , dan intensitas turbulen, I , adalah

$$k = \frac{3}{2} (u_{avg} I)^2$$

2.12. Kondisi Batas

Berikut ini adalah beberapa kondisi batas yang tersedia dalam piranti lunak simulasi CFD komersial antara lain:

- ***Velocity inlet***: kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran, beserta dengan seluruh properti aliran skalar yang relevan pada *inlet* aliran. Properti *total* (stagnasi) dari aliran tidak tetap, jadi akan meningkat terhadap nilai apapun yang diperlukan untuk menyediakan distribusi kecepatan yang diinginkan. Kondisi batas ini dimaksudkan untuk aliran *incompressible*, dan kondisi ini berguna dalam aliran *compressible* yang akan mengarahkan ke hasil nonfisik karena kondisi ini mengizinkan kondisi stagnasi pada halangan *solid*, karena hal ini dapat menyebabkan properti *inflow stagnation* menjadi sangat tidak seragam.
- ***Out Flow***: kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan aliran keluar yang mana kecepatan aliran dan tekanannya tidak diketahui sebelum solusi masalah aliran dilakukan. Kondisi batas ini tidak dapat digunakan dalam kasus aliran *compressible*, aliran *unsteady* dengan densitas bervariasi meskipun merupakan aliran *incompressible*, dan masalah yang melibatkan kondisi batas *pressure inlet*.
- ***Wall***: Kondisi batas ini digunakan untuk daerah fluida dan padat terikat. Dalam aliran *viscous*, kondisi batas tanpa slip diberlakukan pada dinding secara *default*, tetapi dapat juga menentukan komponen kecepatan tangensial dalam hal gerakan translasi atau rotasi dari batas dinding, atau model “slip” dinding dengan menentukan gesekan.

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai metode penelitian secara numerik yang akan digunakan. Metode ini menggunakan piranti lunak simulasi CFD komersial untuk menganalisis karakteristik aliran tiga dimensi dalam *rectangular ducting* dengan variasi sudut bukaan *damper* 0° , 10° , 20° , dan 30° yang terletak pada daerah *downstream* setelah *elbow* $x/Dh=2$ dan besar kecepatan pada sisi inlet 10 dan 40 m/s. Berikut metodologi pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Studi yang dilakukan guna mencari literatur yang berkaitan dengan tema penelitian, melalui mengumpulkan informasi baik dari artikel ilmiah, jurnal, *text book*, dan hasil dari penelitian yang dilakukan sebelumnya

2. Simulasi

Penelitian ini menitikberatkan untuk mengetahui fenomena aliran tiga dimensi sebelum dan sesudah melalui *damper*. Pada tahap ini, terdiri dari tiga tahap yakni, *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*.

3. Penyusunan Laporan

Laporan ini tersusun atas pendahuluan, tinjauan pustaka, metodologi penelitian, analisis dari hasil simulasi, kesimpulan dan saran dalam pelaksanaan simulasi yang telah dilakukan

3.1. Geometri Ducting

Ducting pada penelitian ini memiliki penampang *rectangular*, dan pada bagian *inlet* terhubung *elbow* 90, kemudian terpasang juga bodi pengganggu berupa *dampers* yang terletak pada jarak $x/D = 2$ sesudah *elbow*. Geometri *ducting* dan penempatan *dampers* diilustrasikan oleh gambar 3.1. Spesifikasi dari *domain* pemodelan ini adalah sebagai berikut:

- Bentuk Penampang : *Rectangular*
- Panjang *downstream straight channel* (L_o) : 6000 mm
- Panjang *upstream straight channel* (L_i) : 1800 mm
- Tinggi dan lebar ($a \times b$) : 300×300 mm
- *Elbow Inner radius* (r_i) : 300 mm
- *Elbow Outer radius* (r_o) : 600 mm
- *Hydraulic diameter* (D_h) : 300 mm

3.2. Metode Numerik

Penelitian ini menggunakan piranti lunak komputasi fluida komersial guna melakukan pendekatan numerik dan membuat geometri model, serta melakukan diskritisasi (*meshing*) pada model. Secara umum, urutan kerja yang dilakukan pada penelitian numerik dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap *pre-processing* dan dilanjutkan dengan tahap *post-processing*.

3.2.1 Tahap *pre-processing*

- a) Membuat model tiga dimensi berupa *ducting* yang mengacu pada geometri seperti gambar 3.1. Model *ducting* dibuat dalam variasi sudut kemiringan bodi pengganggu $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$, dan 30° . Dalam penelitian ini, dilakukan penambahan *elbow*

pada bagian *inlet* , penambahan tersebut dimaksudkan untuk mendefinisikan profil kecepatan yang telah terpengaruh oleh adanya *elbow* sebelum menuju bodi pengganggu (*damper*).

- b) Pembuatan *meshing* dilakukan untuk setiap variasi kemiringan bodi pengganggu. *Meshing* dilakukan dengan membagi volume menjadi 3 bagian, yaitu *upstream straight channel*, *elbow*, dan *downstream straight channel*. *Meshing* volume yang digunakan dengan tipe *Hexahedral-map*. Metode *meshing* yang digunakan adalah *grading* dengan distribusi *mesh* yang semakin rapat pada semua dinding. Hal ini dilakukan sebagai efek adanya *wall function*. Hasil dari *meshing* dan *domain* simulasi diilustrasikan oleh gambar 3.2 dan 3.3.

3.2.2. Posisi Pengambilan Data Pada Domain Benda Uji

Mengacu dari gambar 3.3. menunjukkan posisi pengambilan data profil kecepatan pada sisi *downstream* dan koefisien tekanan pada *elbow*. Referensi nol pada sisi *downstream* terletak di $x/D_h=2$. Pengambilan data profil kecepatan sisi *downstream* diambil di posisi $x/D_h= -1$ dan $x/D_h=1$ s/d $x/D_h=10$. Pada *elbow*, data diambil di posisi $\varphi=0^\circ$; $\varphi=30^\circ$; $\varphi=60^\circ$; dan $\varphi=90^\circ$ baik sisi *inner* maupun *outer wall*.

3.2.3. Tahap *post-processing* menggunakan piranti lunak simulasi CFD komersial

- a) *Grid*

Langkah pertama yang dilakukan pada *software* simulasi CFD komersial adalah *read* untuk data hasil *meshing*.

Kemudian dilakukan *grid checking*. Setelah itu skala ditentukan dalam satuan mm.

b) *Models*

Pada langkah ini dilakukan pemodelan karakteristik aliran, meliputi pemilihan model *solver pressure based*, *unsteady* dan menggunakan model turbulen *k-ε Realizable* berdasarkan penelitian **Nur Ikhwan** (2009).

c) *Materials*

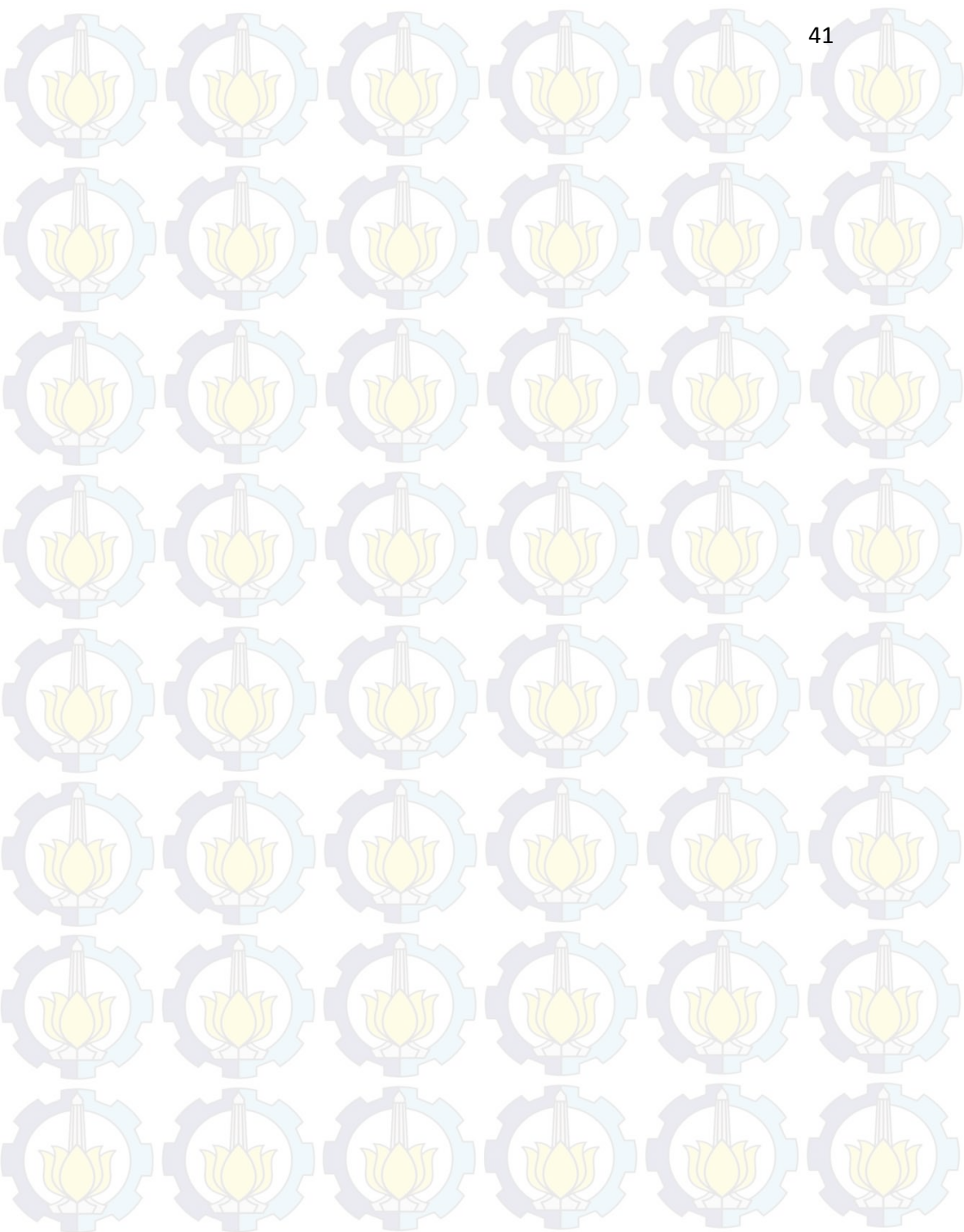
Pada tahap dimasukkan data *properties* material fluida yaitu udara dengan *density* (ρ) $1,225 \text{ kg/m}^3$ dan *viskositas absolute* (μ) $1,7894 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$

d) *Operating Conditions*

Menentukan kondisi daerah operasi dan lingkungan di sekitar benda uji. *Operating conditions* menggunakan *operating pressure* sebesar 101325 pascal

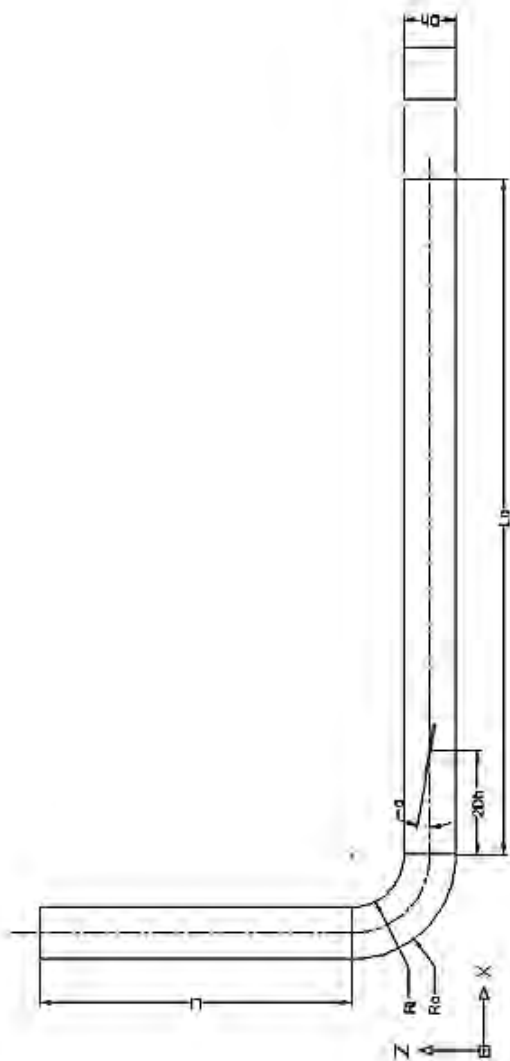
e) *Boundary Conditions*

Menentukan parameter-parameter dan batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji pada *inlet* maupun *outlet*. Daerah *inlet* didefinisikan sebagai *velocity inlet* dalam m/s dan *outlet* didefinisikan sebagai *out flow*. Untuk kondisi batas *upstream straight channel*, *downstream straight channel* dan juga *damper* didefinisikan sebagai *wall*, seperti yang tertera pada gambar 3.3. *Inlet* yang dimaksud adalah berupa kondisi awal mula fluida memasuki *upstream straight channel*, pada bagian ini *velocity inlet* diatur dengan variasi 10 m/s dan 40 m/s. pemodelan dari wall didefinisikan sebagai *stationary wall* dan *no slip wall*. *No slip wall*

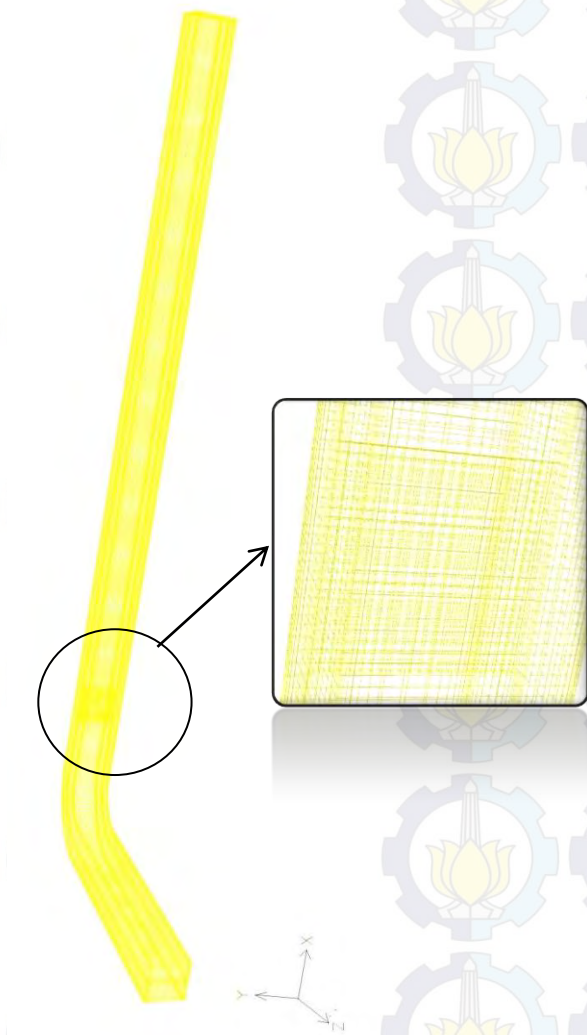


j) *Post - Processing*

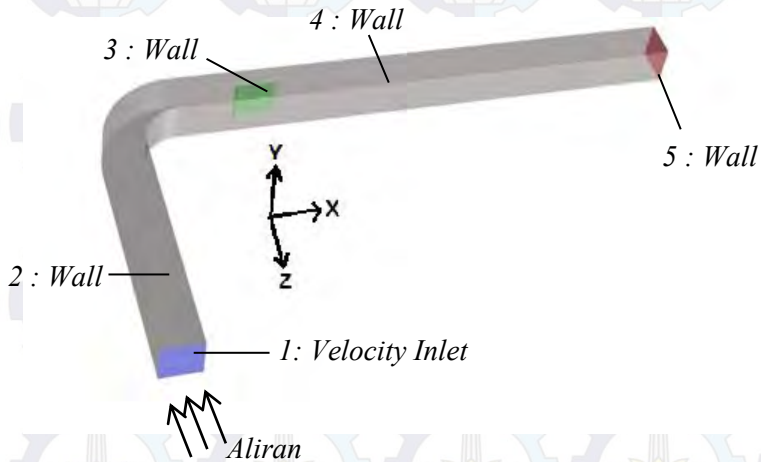
Merupakan penampilan hasil setelah dilakukan iterasi. Hasil tersebut berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif berupa profil kecepatan pada sebelum *elbow*, pada *elbow*, setelah *elbow* dan distribusi koefisien tekanan pada *inner* dan *outer wall* pada *elbow*. Data kualitatif berupa *pathline*, *velocity vector* pada setiap *cross –section*, dan kontur kecepatan



Gambar 3.1. Geometri Ducting



Gambar 3.2. Mesh pada Ducting

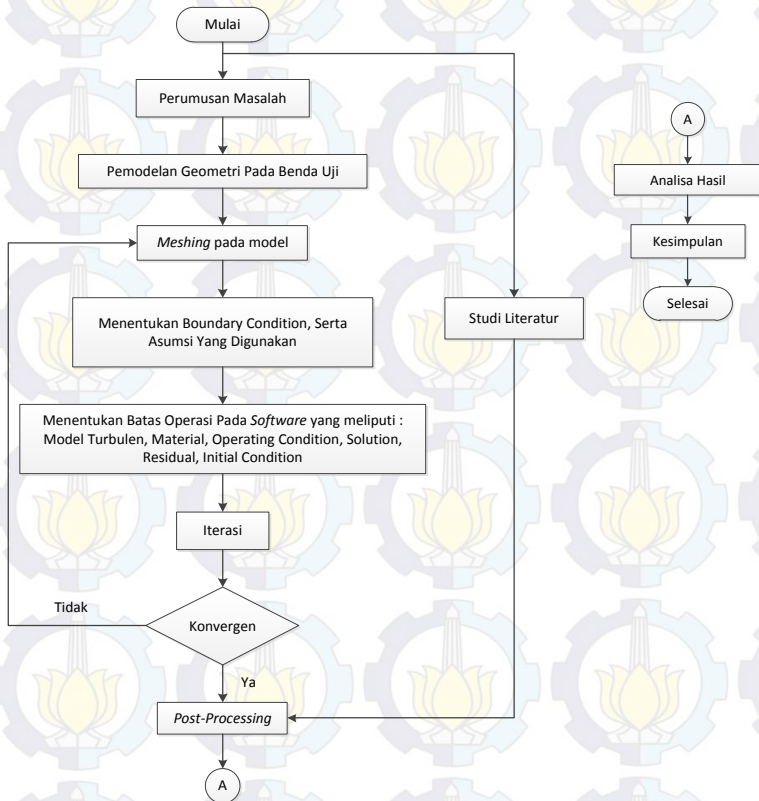


Gambar 3.3. Domain pemodelan dan kondisi batas dari Ducting

Nomenklatur :

1. Inlet
2. Upstream Straight Channel
3. Rectangular Elbow 90°
4. Damper
5. Downstream Straight Channel
6. Outlet

Secara singkat prosedur penelitian numerik pada *rectangular duct* ini dapat dijelaskan dengan menggunakan *flow chart* yang ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4. Diagram alir penelitian

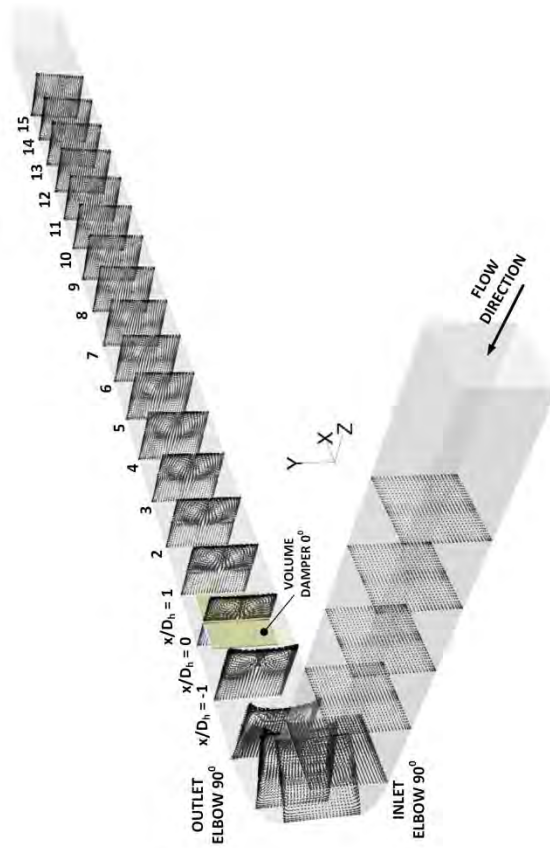
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini ditampilkan data, grafik dan penjelasan dari hasil studi numerik. Hasil studi ditampilkan dan dibahas dalam beberapa sub-bab meliputi vektor kecepatan pada penampang melintang (*cross section*) yang telah ditentukan, profil kecepatan dan visualisasi aliran. Kemudian akan dilanjutkan pembahasan hanya pada variasi sudut kemiringan 0° dan 30°

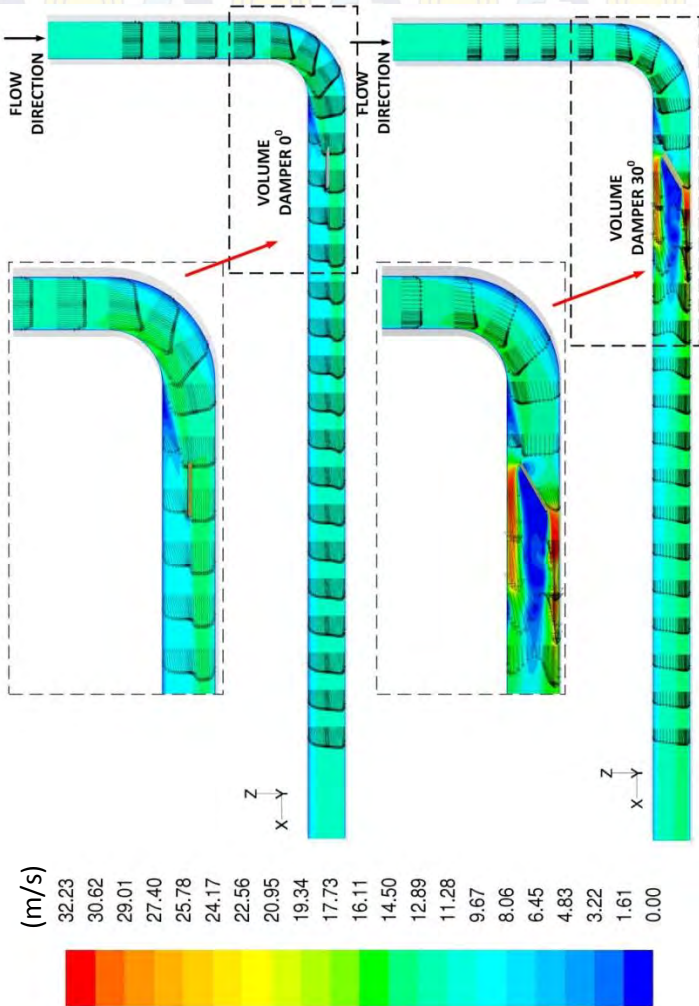
Secara garis besar pembahasan hasil dan analisa pada penelitian ini dibagi menjadi dua variasi, yaitu pembahasan hasil numerik dan visualisasi aliran pada *sudut kemiringan* 0° dan 30° . Dalam setiap bagian diuraikan hasil numerik dalam dua macam variasi kecepatan yaitu 10 m/s dan 40 m/s.

4.1. Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan Pada Sudut Kemiringan $\alpha=0^\circ$ dan 30° $Re=2.05 \times 10^5$

Profil Kecepatan pada *ducting* dipengaruhi oleh sudut kemiringan *damper* sebagai bodi pengganggu kemudian diamati perkembangan aliran di dalamnya. Distribusi kecepatan disajikan dalam bentuk kecepatan tak berdimensi (u/U) dimana u adalah kecepatan lokal pada *section* tersebut dan U merupakan kecepatan maksimum pada *section* yang sama. Berikut ini akan dibahas perkembangan *velocity profile* setiap *section* sebagaimana yang tertera pada gambar 4.2. Penempatan setiap *cross section* dapat dilihat pada gambar 4.1.

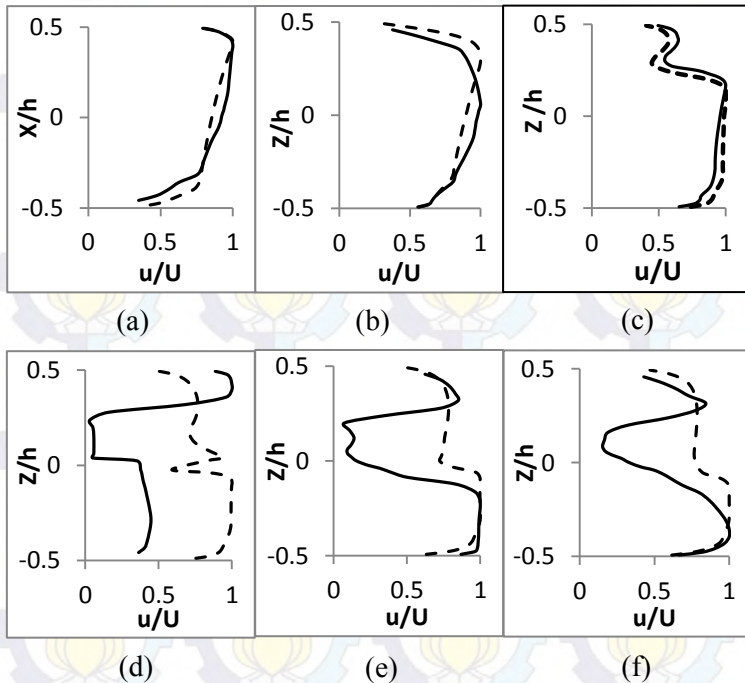


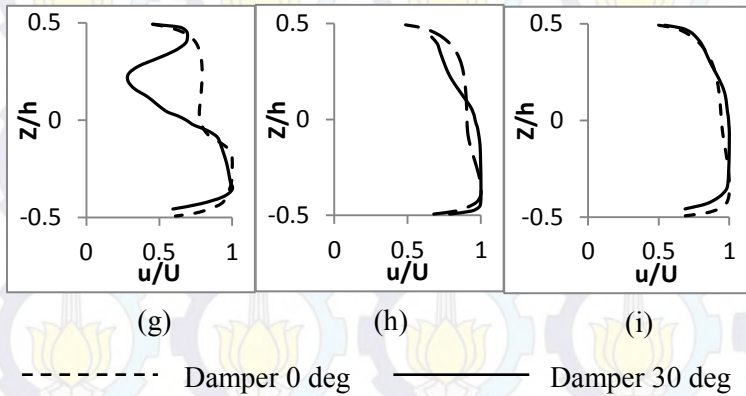
Gambar 4.1. Penempatan posisi cross-section



Gambar 4.2. Perkembangan aliran *velocity profile* dan kontur kecepatan sepanjang untuk $Re=2.05 \times 10^5$

Untuk lebih jelasnya, dari gambar 4.2 akan dibahas penjelasan analisa tentang bagaimana perilaku aliran dua dimensi dari *upstream* menuju *downstream* berupa grafik *velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu baik pada absis maupun ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai $Z/h = 0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner elbow*, sedangkan $Z/h = -0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer elbow*. Agar lebih detail, maka dipaparkan dalam grafik perbandingan antara sudut bukaan 0° dan 30° sebagaimana yang tertera pada gambar 4.3.





Gambar 4.3. Grafik *velocity profile* masing-masing posisi *cross-section* berdasarkan x/D_h : a). 0° ; b). 90° ; c). -1; d). 0; e). 1; f). 2 ;g). 3; h). 10; i). 15

Pada gambar 4.2 secara umum menggambarkan bentuk profil kecepatan di sepanjang sisi *upstream* sampai *downstream* dijelaskan sebagai berikut: saat memasuki *elbow*, profil kecepatan sudah mengalami perkembangan sejauh $6D_h$, seperti pada gambar 4.3.(a) kecepatan pada sisi *inner* lebih besar dari pada sisi *outer* hal ini dipengaruhi oleh adanya perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer* bentuk profil ini akan sama sampai *outlet elbow* (gambar 4.3.(b)). Pada jarak $x/D_h = -1$ sebelum melewati *damper* terjadi kerugian energi kinetik (*kinetic energy losses*) yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di sisi *inner elbow* sehingga terdapat *blockage effect* seperti pada gambar 4.3.(c) akibatnya sebagian besar aliran akan mengalir pada sisi *outer* sehingga memiliki kecepatan yang lebih besar. Ketika aliran terganggu oleh laluan berupa *damper* seperti pada gambar 4.3.(d), terdapat perbedaan yang signifikan pada variasi kedua sudut *damper*, pada sudut 30° terjadi percepatan pada sisi *inner wall*,

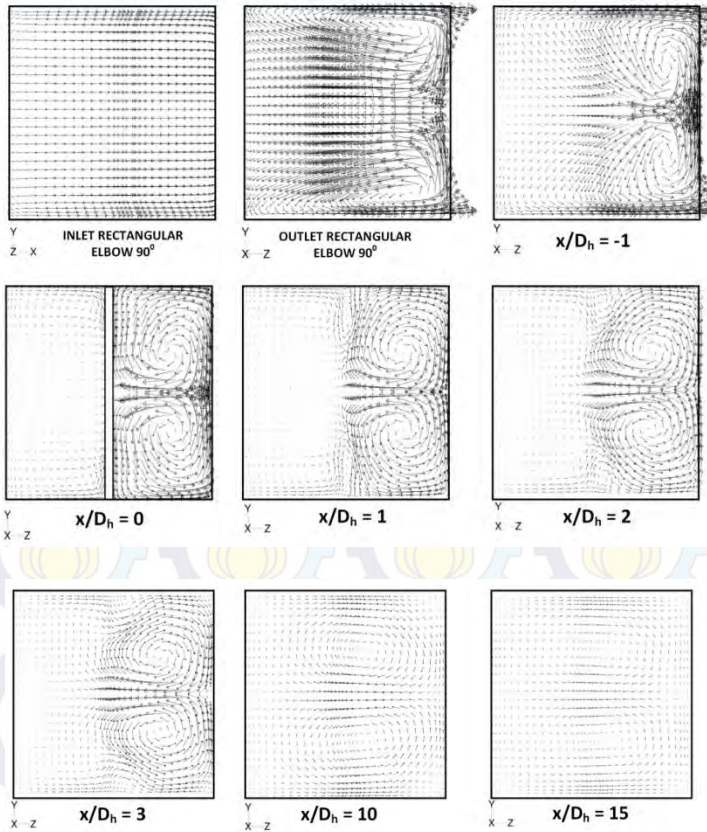
hal ini disebabkan karena adanya penyempitan luas penampang, namun sebagian aliran yang mengalir pada sisi *outer wall* memiliki kecepatan yang rendah. Sedangkan pada sudut 0° sisi yang memiliki kecepatan lebih tinggi adalah sisi *outer*, disebabkan pada sisi *inner* masih terdapat pengaruh aliran sekunder sebelumnya. Setelah melalui *damper* sejauh D_h terjadi *recovery* di sisi *centerline*, terlihat pada gambar 4.3.(e); (f); (g). Selanjutnya pada jarak $x/D_h=10$ s/d 15 kedua aliran tersebut sudah normal kembali.

4.1.1. Perbandingan Vektor Kecepatan Setiap *Cross-Section* Pada $Re = 2.05 \times 10^5$ Dengan Sudut Kemiringan $\alpha=0^\circ$ dan 30°

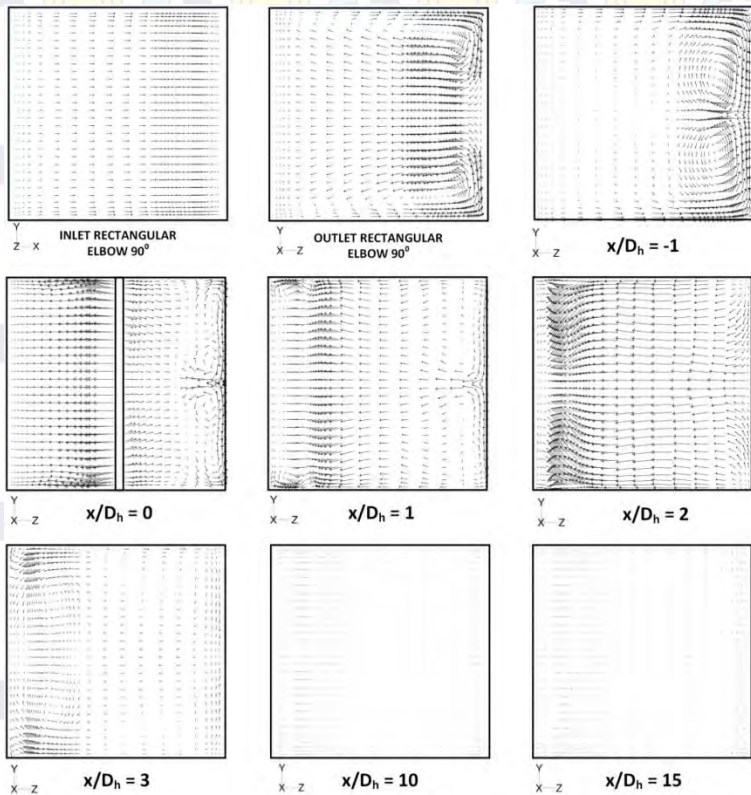
Pada sub-bab ini akan disampaikan visualisasi berupa vektor kecepatan di setiap *cross-section* yang posisinya telah ditunjukkan oleh gambar 4.1. Dari visualisasi aliran tersebut akan diperoleh perbandingan yang lebih jelas mengenai perilaku aliran yang terjadi pada *rectangular duct* secara tiga dimensi. Berikut ini hasil dari masing-masing *cross-section* yang diambil gambar vektor kecepatannya seperti yang terlihat pada gambar 4.5 dan 4.6.

Berdasarkan gambar 4.5 dan 4.6 dapat terlihat visualisasi aliran dalam bentuk tiga dimensi dari *inlet elbow* sampai $x/D_h=15$. Daerah *outlet elbow* di sisi *inner wall* dimana terjadi perlambatan disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder, sehingga hal ini berpengaruh terhadap *velocity profile* yang terlihat lebih kecil pada sisi *inner*-nya. Setelah aliran mengalir sejauh $10D_h$ aliran sekunder berangsur-angsur kembali mengikuti aliran utamanya, hal ini ditandai dari vektornya berbentuk titik, artinya vektor tersebut searah dengan sumbu x. Pada sudut

bukaan 30° dijumpai aliran sekunder pada sisi *outer* maupun *inner* di posisi $x/D_h=0$ s/d 2, hal itu disebabkan karena efek kerugian energi kinetik di sisi *centerline* yang mempengaruhi aliran didekat dindingnya.



Gambar 4.5. Visualisasi vektor kecepatan di setiap *cross-section* untuk $Re = 2.05 \times 10^5$; $\alpha = 0^\circ$

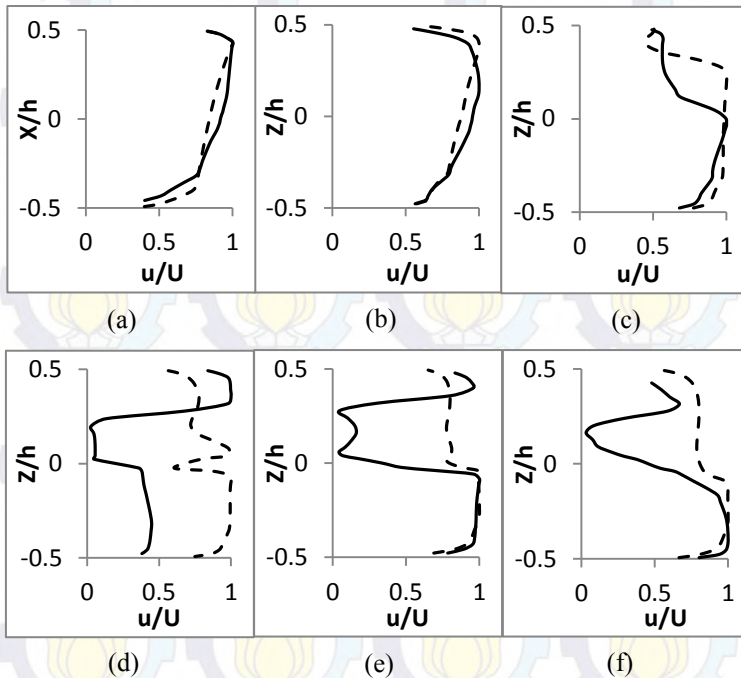


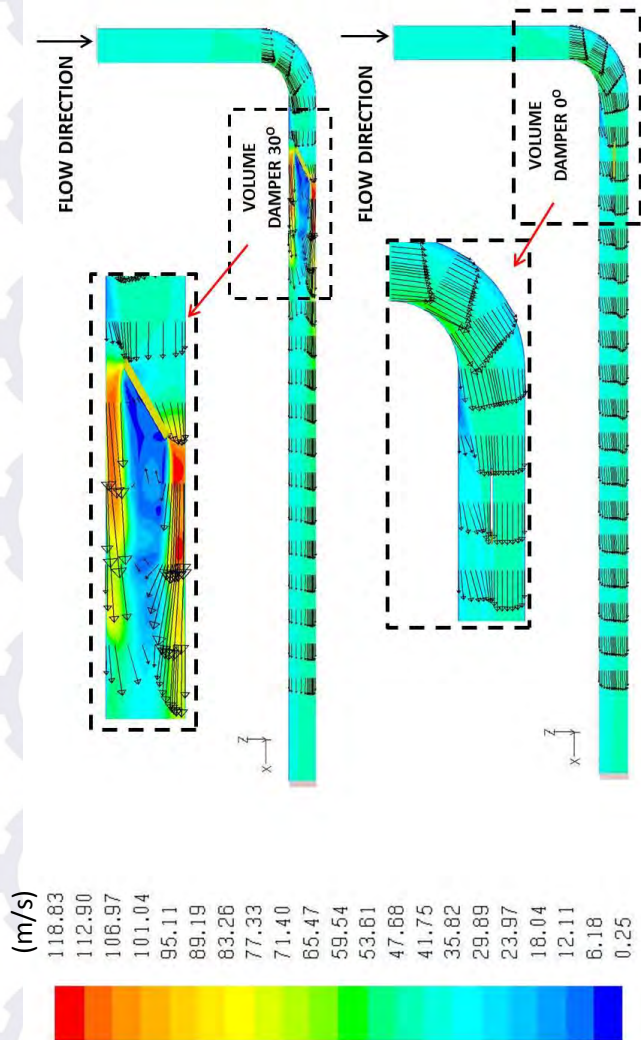
Gambar 4.6. Visualisasi vektor kecepatan di setiap *cross-section* untuk $Re = 2.05 \times 10^5$; $\alpha=30^\circ$

4.2. Perbandingan Distribusi Profil Kecepatan Pada Sudut Kemiringan $\alpha=0^\circ$ dan 30° $Re=8.2 \times 10^5$

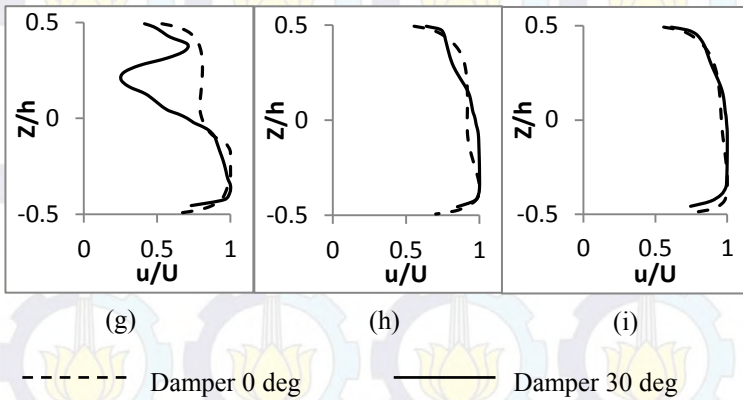
Berikut ini adalah gambaran umum *velocity profile* beserta kontur kecepatan yang mewakili besar kecepatan sepanjang aliran seperti pada gambar 4.7.

Dari gambar 4.7 akan dibahas penjelasan analisa tentang bagaimana perilaku aliran secara dua dimensi dari *upstream* menuju *downstream* berupa grafik *velocity profile* dalam bentuk bilangan tak berdimensi yang bernilai dari nol sampai satu baik pada absis maupun ordinat. Absis pada grafik menunjukkan posisi titik dimana nilai $Z/h = 0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *inner elbow*, sedangkan $Z/h = -0.5$ adalah posisi yang searah dengan sisi *outer elbow*, agar lebih detail dipaparkan dalam grafik perbandingan antara sudut bukaan 0° dan 30° sebagaimana yang tertera pada gambar 4.8.





Gambar 4.7. Perkembangan *velocity profile* dan kontur kecepatan sepanjang aliran untuk $Re=8.2 \times 10^5$



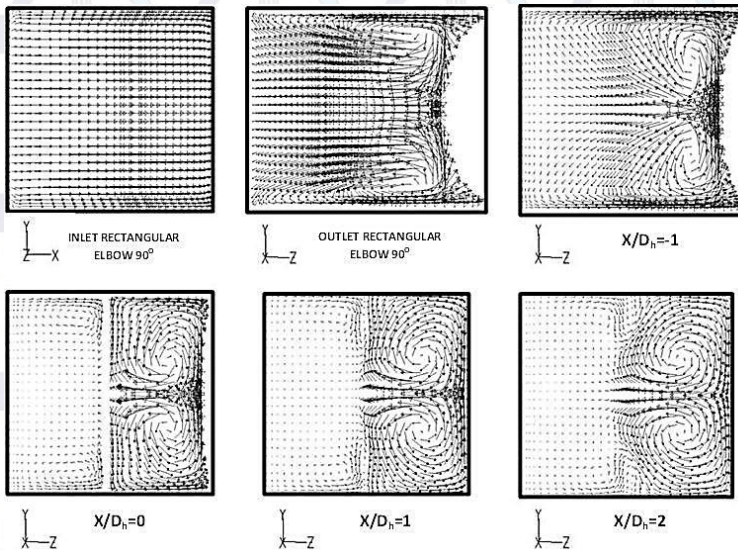
Gambar 4.8. Grafik *velocity profile* masing-masing posisi *cross-section* berdasarkan x/D_h : a). 0° ; b). 90° ; c). -1; d). 0; e). 1; f). 2 ;g). 3; h). 10; i). 15

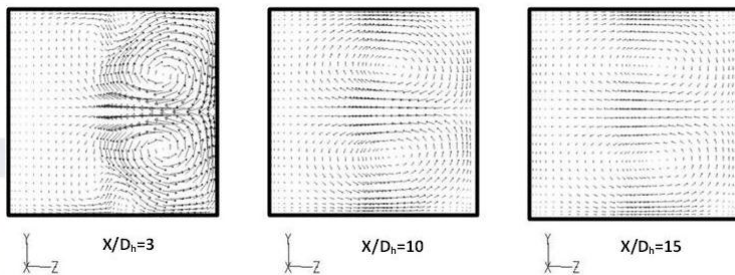
Pada gambar 4.8 secara umum bentuk profil kecepatan di sepanjang sisi *upstream* sampai *downstream* dijelaskan sebagai berikut: saat memasuki *elbow*, profil kecepatan sudah mengalami perkembangan sejauh $6D_h$, seperti pada gambar 4.8.(a) kecepatan pada sisi *inner* lebih besar dari pada sisi *outer* hal ini dipengaruhi oleh adanya perbedaan tekanan antara sisi *inner* dan *outer* bentuk profil ini akan sama sampai *outlet elbow* (gambar 4.8.(b)). Pada jarak $x/D_h = -1$ sebelum melewati *damper* terjadi kerugian energi kinetik (*kinetic energy losses*) yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder di sisi *inner elbow* sehingga terdapat *blockage effect* seperti pada gambar 4.8.(c) akibatnya sebagian besar aliran akan mengalir pada sisi *outer* sehingga memiliki kecepatan yang lebih besar. Ketika aliran terganggu oleh laluan berupa *damper* seperti pada gambar 4.8.(d), terdapat perbedaan yang signifikan pada variasi kedua sudut *damper*, pada sudut 30° terjadi percepatan pada sisi *inner wall*, hal ini disebabkan karena adanya penyempitan luas penampang, namun sebagian aliran yang mengalir pada sisi *outer wall* memiliki kecepatan yang rendah. Sedangkan pada sudut 0° sisi yang memiliki kecepatan lebih tinggi adalah sisi *outer*, disebabkan pada sisi

inner masih terdapat pengaruh aliran sekunder sebelumnya. Setelah melalui *dumper* sejauh D_h terjadi *recovery* di sisi *centerline*, terlihat pada gambar 4.8.(e); (f); (g). Selanjutnya pada jarak $x/D_h=10$ s/d 15 kedua aliran tersebut sudah normal kembali

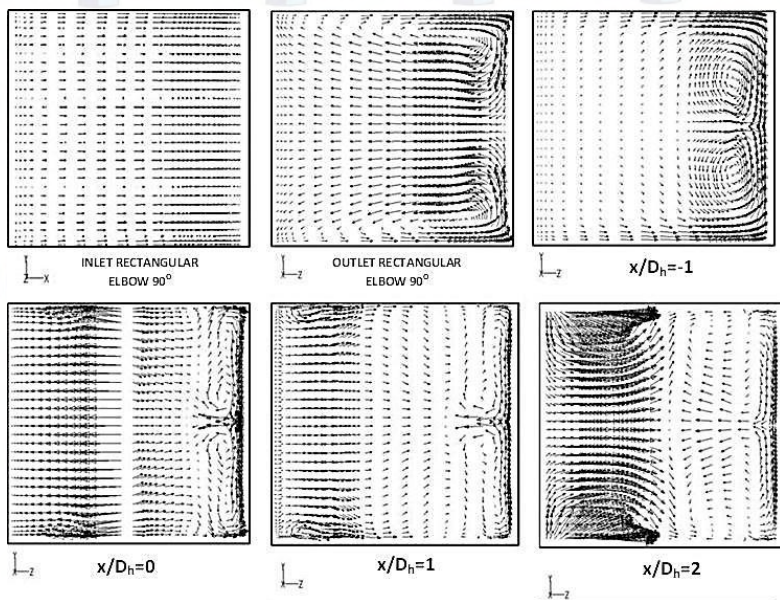
4.2.1. Perbandingan Vektor Kecepatan Setiap *Cross-Section* Pada $Re = 8.2 \times 10^5$ Dengan Sudut Kemiringan $\alpha=0^\circ$ dan 30°

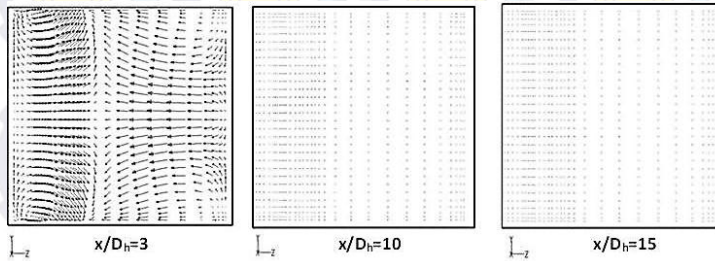
Penjelasan tentang terbentuknya aliran sekunder pada penampang tertentu akan dipaparkan lebih jelas pada pembahasan di sub-bab ini melalui gambar 4.9 dan 4.10.





Gambar 4.9. Visualisasi vektor kecepatan di setiap *cross-section* untuk $Re = 8.2 \times 10^5$; $\alpha = 0^\circ$





Gambar 4.10. Visualisasi vektor kecepatan di setiap *cross-section* untuk $Re = 8.2 \times 10^5$; $\alpha=30^\circ$

Berdasarkan gambar 4.9 dan 4.10 dapat terlihat visualisasi aliran dalam bentuk tiga dimensi dari *inlet elbow* sampai $x/D_h=15$. Daerah *outlet elbow* di sisi *inner wall* dimana terjadi perlambatan disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder, sehingga hal ini berpengaruh terhadap *velocity profile* yang terlihat lebih kecil pada sisi *inner*-nya. Setelah aliran mengalir sejauh $10D_h$ aliran sekunder berangsur-angsur kembali mengikuti aliran utamanya, hal ini ditandai dari vektornya berbentuk titik, artinya vektor tersebut searah dengan sumbu x . Pada sudut bukaan 30° dijumpai aliran sekunder pada sisi *outer* maupun *inner* di posisi $x/D_h=0$ s/d 2 , hal itu disebabkan karena efek kerugian energi kinetik di sisi *centerline* yang mempengaruhi aliran didekat dindingnya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan Hasil Penelitian

Dari hasil penelitian yang telah dibahas pada bab sebelumnya maka dapat diambil kesimpulan meliputi sebagai berikut :

1. Adanya perlambatan aliran di daerah yang menghubungkan *upstream* dan *downstream* sesaat sebelum melalui *damper* untuk semua variasi sudut, hal ini disebabkan adanya *blockage effect* akibat terbentuknya aliran sekunder pada sisi *inner wall* dekat dinding, daerah ini memiliki momentum yang rendah.
2. Tidak ada pengaruh yang signifikan pada variasi kecepatan terhadap proses *recovery* aliran, melainkan proses *recovery* aliran sangat dipengaruhi variasi sudut bukaan *damper* 0° , 10° , 20° , 30°
3. Pembentukan aliran sekunder pada sudut bukaan *damper* 0° hanya terjadi pada sisi *inner wall* , sedangkan pada sudut bukaan *damper* 30° aliran sekunder terbentuk pada sisi *inner* maupun *outer wall*.
4. Pada variasi sudut bukaan *damper* 0° memiliki variasi *range* kecepatan yang paling rendah, sedangkan sudut bukaan *damper* 30° memiliki variasi *range* kecepatan yang paling tinggi, hal ini disebabkan penyempitan luas penampang di daerah sekitar *damper*, dimana di daerah tersebut terjadi percepatan aliran.
5. Sudut bukaan *damper* 30° merupakan sudut yang paling efektif untuk mempercepat proses *recovery* aliran dan

menanggulangi timbulnya aliran sekunder yang terletak di dekat dinding.

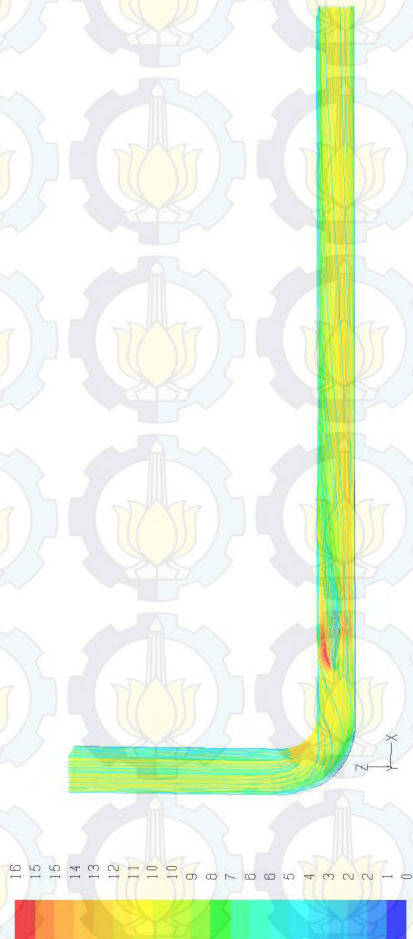
5.2. Saran

Adapun saran yang diperlukan untuk kedepannya adalah sebagai berikut :

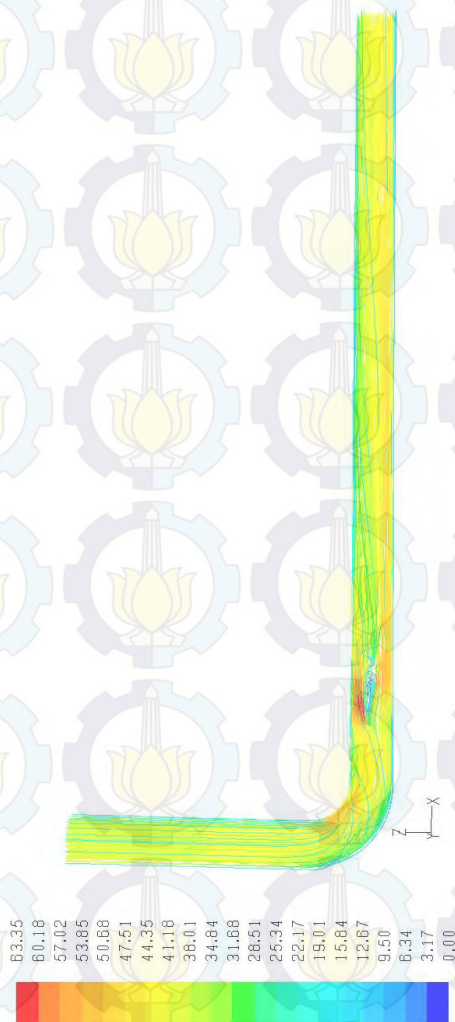
1. Diperlukan adanya kajian eksperimen agar hasil simulasi dapat dibandingkan dengan kondisi aktualnya.
2. Adanya penelitian lebih lanjut baik simulasi numerik aliran tiga dimensi atau kajian eksperimen sangat disarankan.

Lampiran

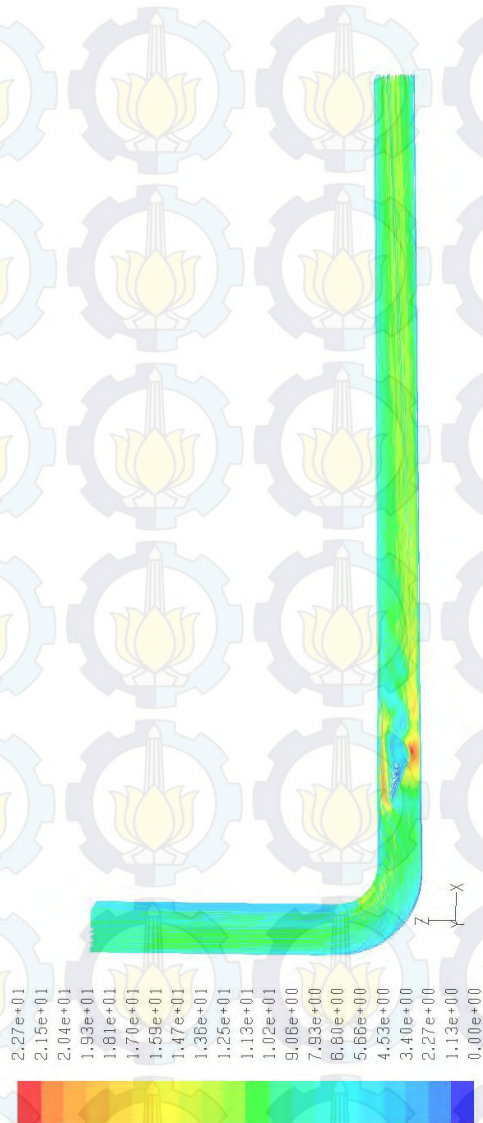
A. *Pathlines* pada sudut $\alpha=10^\circ$; Kecepatan 10 m/s



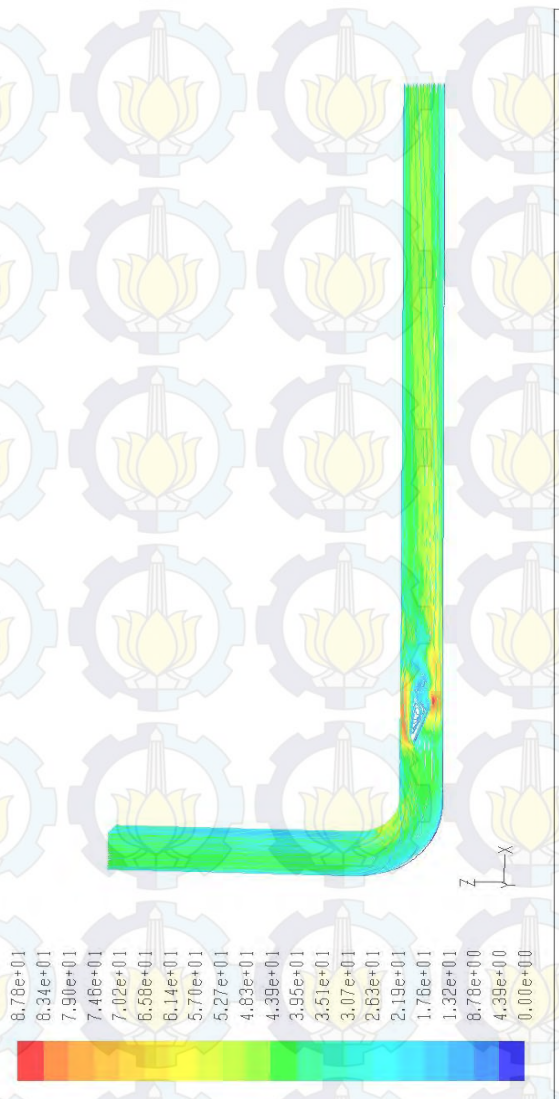
B. *Pathlines* pada sudut $\alpha=10^\circ$; Kecepatan 40 m/s



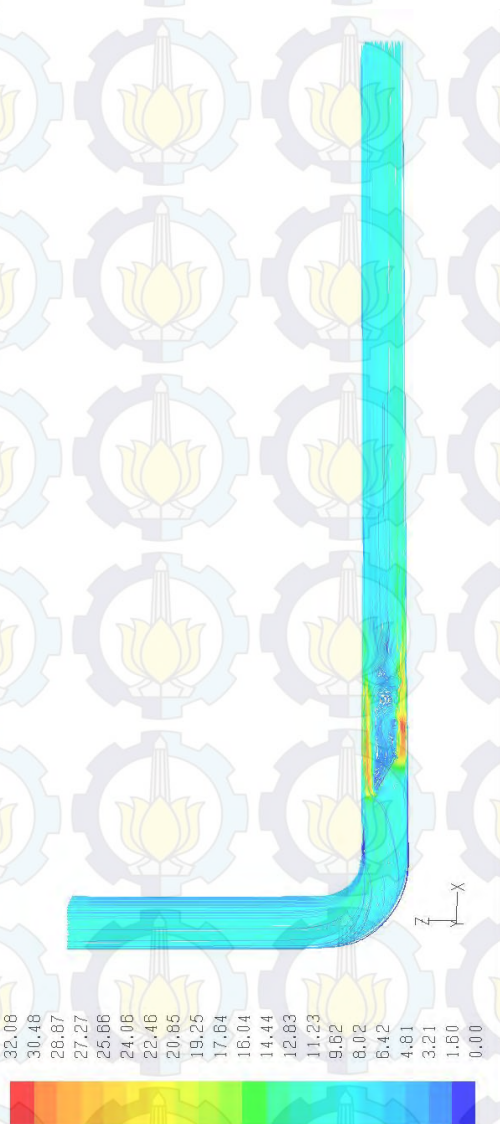
C. *Pathlines* pada sudut $\alpha=20^\circ$; Kecepatan 10 m/s



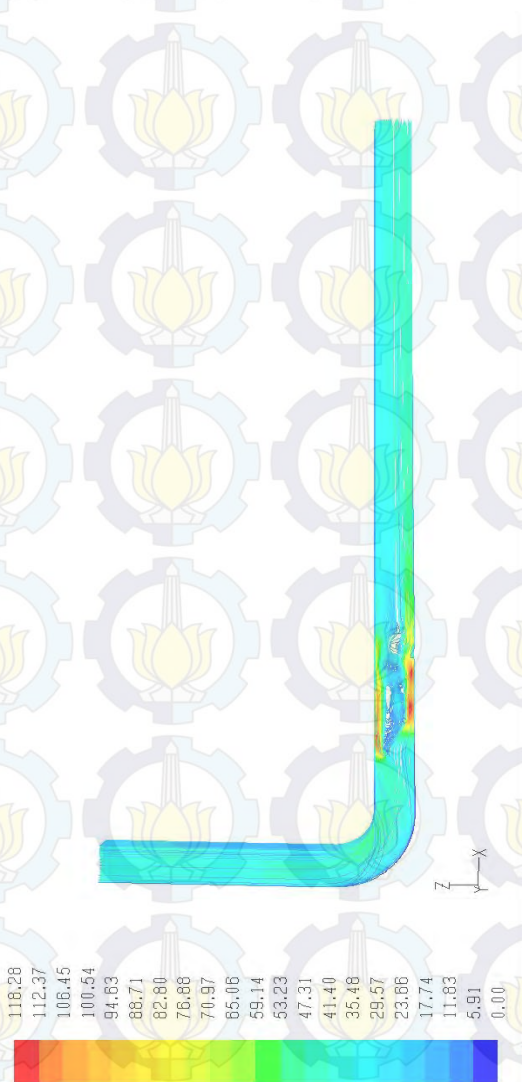
D. *Pathlines* pada sudut $\alpha=20^\circ$; Kecepatan 40 m/s



E. *Pathlines* pada sudut $\alpha=30^\circ$; Kecepatan 1.0 m/s



F. *Pathlines* pada Sudut $\alpha=30^\circ$; Kecepatan 40 m/s



DAFTAR PUSTAKA

1. Fox, R.W., Mc Donald, A.T. dan Pritchard, P.J. 2010. **Introduction to Fluid Mechanics, 7th edition.** New York: John Wiley and Sons.
2. Danbon, F. dan Sollicc, C. 2000. **Aerodynamic Torque of a Butterfly Valve-Influence of an Elbow on the Time-Mean and Instantaneous Aerodynamic Torque.** Nantes: Ecole des Mines de Nantes, Département Systèmes.
3. Zaldhy L. P. P, Louis. 2015. **Studi Numerik Karakteristik Aliran Melalui Modified Octagonal U-Bend Dengan Dan Tanpa Guide Vane.** Jurusan Teknik Mesin : ITS
4. Nakayama Y., dan Boucher R.F. 1998. **Introduction to Fluid Mechanics.** Oxford: Butterworth-Heinemann.
5. Miller, D.S. 1990. **Internal Flow System, 2nd edition.** Bedford: BHRA.
6. Ikhwan, Nur. 2009. **Benchmarking Akurasi Pemodelan Turbulensi Dalam Mensimulasikan Aliran Unisotropic Turbulence.** Surabaya: Project Grant QUE Project, sub-Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

7. Rup, K., dan Sarna, P. 2011. **Analysis of Turbulent Flow Through a Square-Sectioned Duct with Installed 90-degree Elbow.** Cracow: Elsevier.
8. Idel'chick, I.E. 1960. **Handbook of Hydraulic Resistance.** Gosudarstvennoe Energeticheskoe Izdatel'stvo : Moskva-Leningrad.
9. Xiong, R., dan Chung, J.N. 2008. **Effects of Miter Bend on Pressure Drop and Flow Structure in Micro-Fluidic Channels.** Gainesville: International Journal of Heat and Mass Transfer 51.
10. Tuakia, Firman. 2008. **Dasar-dasar CFD menggunakan Fluent.** Informatika, Bandung.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, 7 Juli 1991, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu TK Dharma Mulya Surabaya (1995-1997), SD Widya Merti Surabaya (1997-2003), SMP Khadijah Surabaya (2003-2006), dan SMA Khadijah Surabaya (2006-2009). Pada tahun 2009 Penulis diterima di Program Studi D3 Teknik Mesin FTI – ITS dan terdaftar sebagai mahasiswa, kemudian melanjutkan studinya ke jenjang sarjana pada program Lintas Jalur Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS. Mekanika Fluida adalah topic tugas akhir yang dipilih penulis

Selama duduk di bangku kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan perkuliahan. Penulis juga pernah mengikuti berbagai kegiatan dan bergabung dalam organisasi. Kegiatan yang pernah diikutinya antara lain : Penulis juga terlibat aktif dalam keorganisasian yang ada di dalam Program Studi D3 Teknik Mesin yaitu HMDM (Himpunan Mahasiswa D3 Teknik Mesin), Staff Dept. Ristek di HMDM periode 2010/2011 dan Sekretaris Tim Nogogeni. Pelatihan yang pernah diikuti penulis : Pelatihan Kerja 2011 bidang Otomotif kerja sama Pemkot Surabaya – ITS